

Juho Pakaslahti

SÄHKÖN MIKROTUOTANNON LIITTÄMINEN PIENJÄNNITE- VERKKOON - RISKIT JA MAHDOLLISUUDET

SÄHKÖN MIKROTUOTANNON LIITTÄMINEN PIENJÄNNITE- VERKKOON - RISKIT JA MAHDOLLISUUDET

Juho Pakaslahti
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka, sähkövoimatekniikka

Tekijä: Juho Pakaslahti

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Sähkön mikrotuotannon liittäminen pienjänniteverkkoon – riskit ja mahdollisuudet

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Micro Level Electricity Production in Low Voltage Grid

Työn ohjaaja: Esa Silomaa

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: Kevät 2020

Sivumäärä: 64

Sähköverkon toimintalogiikka on muuttumassa. Tällä hetkellä sähköntuotannosta vain pieni osa tuotetaan mikrokokoluokan laitteistoilla. Mikrotuotannon määrä on lisääntynyt viime vuosina ja tulevaisuudessa tuotannon kasvun oletetaan olevan yhä voimakkaampaa. Verkkoon liitetty mikrotuotanto vaikuttaa sähkön laatuun ja siirtoon. Nämä molemmat vaikuttavat sähköverkkoyhtiöiden toimintaan ja verkon suunnitteluun.

Tuotannon liittämiseksi yleiseen sähköverkkoon on asetettu ehtoja ja rajoitteita. Tässä työssä on tarkoitus kirjallisuuden avulla selvittää mitkä tekijät vaikuttavat mikrotuotantolaitteiston hankintaan, mitkä ovat verkkoon liittämisen ehdot ja miten mikrotuotanto vaikuttaa yleiseen verkkoon.

Työssä keskitytään aurinkosähköön. Aurinkoenergialla tuotetun sähkömäärän oletetaan lisääntyvän sekä määrällisesti että tehollisesti. Lisäys on seurausta taloudellisen kannattavuuden parantumisesta, mutta myös muista syistä.

Mikrovoimalaitos ei saa aiheuttaa ongelmia liittyessään, toimiessaan tai irrotessaan yleisestä verkosta. Mahdolliset ongelmat liittyvät sähkön laatuun, komponenttien kestoisuuteen ja suojausien toimintaan. Käytettäessä standardoituja liityntälaitteita ongelmien ilmentymisen todennäköisyys on alhainen.

Sähkön tuotantolaitoksen liittäminen yleiseen sähköverkkoon on luvanvaraista. Yksittäisen verkkoon standardien mukaisesti liitetyn mikrotuotantolaitoksen vaikutus sähköverkon toimintaan ja sähkön laatuun on vähäistä. Verkkoyhtiön tulee tietää kaikki verkkoon liitetyt laitokset henkilöturvallisuuden vuoksi. Mikrovoimalaitosten lukumäärän ja tuotantotehojen lisääntyessä verkonhallinta vaikeutuu. Käytettäessä mikrotuotannon liittämässä verkkoon standardin mukaisia laitteita ja niissä oikeita asetuksia, ei liittämässä ole turvallisuuteen tai sähkön laatuun liittyviä esteitä.

Asiasanat: sähköntuotanto, mikrotuotanto, aurinkoenergia, sähköverkot.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering, Electrical Engineering

Author(s): Juho Pakaslahti
Title of thesis: Micro Level Electricity Production in Low Voltage Grid
Supervisor(s): Esa Silomaa
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2020
Pages: 64

Electricity distribution network planning is a long term task, which requires information from many data systems (e.g. technical and economic). Traditionally there has been unidirectional power flows: from power plants to consumers. Operating environment of the electricity distribution in the future will be different. Instead of central power production there can be a large number of grid connected micro generations. Distributed power production can have an effect to network loads, safety, reliability and quality of electricity. These all affect operational and planning principles of distribution network.

By now, only a minor part of electricity in Finland is produced by distributed microgenerations. Volume of microproduction has grown fast in a few years and this tendency is assumed to continue in future worldwide including Finland. Especially photovoltaic (PV) power production will be larger; number of PV generators and power produced by those will increase. This increase in the number of microgenerations will happen mainly due economic reasons.

A grid connected microgenerator is not allowed to make any disturbance while connection, production and disconnection to grid. Possible problems from grid connected powerplants can be associated with quality of electricity. Specially fault currents and voltage rise have been issues often concerned. By using standard inverters as connection devices the risk of any problems is minimized and thereby low.

Keywords: Distributed generation, electricity production, network planning, PV power.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 SÄHKÖNJAKELUVERKON SUUNNITTELU	10
3 SÄHKÖNTUOTANTO JA -KULUTUS SUOMESSA	13
4 SÄHKÖN PIENTUOTANTO SUOMESSA	17
4.1 Mikrotuotanto	20
4.2 Sähköntuotantolaitosten luokittelu	22
4.3 Aurinkosähköjärjestelmän osat	23
4.3.1 Aurinkopaneelit	24
4.3.2 Invertteri	26
5 MIKROTUOTANNON TALOUDELLISET KANNUSTIMET	27
5.1 Tuotannon mittaus ja myynti markkinoille	29
5.2 Mittauksen netotus ja nettolaskutus	30
5.3 Siirtomaksu	33
5.4 Verovelvollisuus	33
6 SÄHKÖVERKKO JA SIIHEN LIITTÄMISEN YLEISET VAATIMUKSET	35
6.1 Sähkön laatuvaatimukset	38
6.2 Tuotantolaitoksen vaikutus sähkönlaatuun	40
6.3 Tekniset vaatimukset tuotantolaitoksen liittämiseksi	46
7 MIKROTUOTANTOLAITOKSEN TOIMINTA VIKATILANTEISSA	48
7.1 Suojauksen asettelu	49
7.2 Suojauksen sokaistuminen	50
7.3 Virhelaukaisu suojauksessa	52
7.4 Jälleenkytkentä	53
7.5 Loss Of Mains -tilanne	54
8 TUOTANNON LIITTÄMISEN MERKITYS VERKKOYHTIÖLLE	56
8.1 Siirtohinnoittelu	57
8.2 Nettomittarointi ja –laskutus verkonhaltijan näkökulmasta	57
8.3 Jännitteenousu	58
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	63
LÄHTEET	65

SANASTO

Huipputeho Wp tai kWp (peak power) on hetkellinen huipputeho. Yleisesti viitataan koko järjestelmän huipputehoon, joka saavutetaan parhaissa mahdollisissa olosuhteissa.

Liittymissopimuksella sähkömarkkinalain mukaan tarkoitetaan jakeluverkonhaltijan ja sähkönkäyttöpaikan omistajan tai haltijan (*liittyjä*) välistä sopimusta sähkönkäyttöpaikan liittämisestä nimellisjännitteeltään enintään 20 kilovoltin jakeluverkkoon.

MPPT-säätö (Maximum Power Point Tracking) tarkoittaa säätötekniikkaa, joka mittaa jatkuvasti paneeliston toimintaa ja pyrkii toimintajännitettä mukauttamalla mahdollisimman hyvään hyötysuhteeseen. MPPT-säätimen jännitealue on tyypillisesti 200 - 800 V. Mikäli paneeliston jännite poikkeaa säätimen jännitealueesta, järjestelmä yleensä lakkaa toimimasta. Säätimen alaraja määräytyy usein MPPT-säätimen toimintajännitteen mukaan ja yläraja järjestelmän komponenttien jännitekestoisuuden mukaan.

Netotus tai nettolaskenta tarkoittaa eri vaiheiden sähkön tuotannon ja kulutuksen yhteen laskemista tietylle aikajaksolle.

Nettolaskutuksella tarkoitetaan sähkön käyttökohteeseen sähköverkosta otetun sähkön eri hintakomponenttien eli sähköenergian hinnan, siirtomaksujen ja verojen kompensoimista sähkölaskussa toisena ajankohtana verkkoon syötetyllä sähköllä.

On Grid -järjestelmällä tarkoitetaan yleiseen sähkönjakeluverkkoon liitettyä sähköntuotantojärjestelmää.

Sähköverkkosopimuksella tarkoitetaan jakeluverkonhaltijan ja loppukäyttäjän välistä sopimusta, joka koskee sähkönjakelua jakeluverkon kautta, ja muuta siihen liittyvää verkkopalvelua

Tehokerroin ($\cos \varphi$) kuvaa näennäistehon ja pätötehon suhdetta. Kulma φ kertoo jännitteen ja virran vaihe-eron.

Verkkoonliityntälaitte (invertteri) on järjestelmän laite, jolla liitytään yleiseen verkkoon, ja joka syöttää yleiseen verkkoon päin tehoa. Laitteelta vaaditaan sähkönlaadun ja turvallisuuden kannalta keskeisten standardien täyttämistä.

Verkkopalvelusopimuksella sähkönkäyttäjä tai -tuottaja saa oikeuden käyttää yleistä sähköverkkoa sähkön siirtämiseksi. Verkkopalvelusopimus tehdään aina paikallisen sähköverkkoyhtiön kanssa.

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään sähkön mikrotuotannon liittämisessä pienjänniteverkkoon huomioonotettavia asioita. Mikrotuotannon verkkovaikutuksista Suomessa on vielä vähän kokemuksia. Sähköntuotanto on ollut keskitettyä: suurilta tuotantolaitoksilta on sähkö johdettu kuluttajien tarpeisiin. Sähköverkon rakenne on muodostunut palvelemaan käyttötapaa, jossa teho on kulkenut yhteen suuntaan tuottajalta kuluttajalle. Sähköntuotannon ympäristöystävällisyyteen kiinnitetään yhä enemmän huomiota.

Tulevaisuuden energiasta yhä suurempi osa oletetaan tuotettavan lähellä käyttäjää. Tämä mikrotuotanto nähdään yhdessä ns. älykkään verkon kanssa yhtenä mahdollisuutena vastata kasvavaan sähkönkulutukseen ja sähköntuotannon ympäristöystävällisyyteen. Älykkään sähköverkon ominaisuutena pidetään sen kykyä joustaa kysynnän ja tarjonnan mukaisesti sekä täydentää keskitettyä sähköntuotantoa ja jakelua hajautetuilla ratkaisuilla. Tämä kokonaisuus saattaa johtaa siirrettävän energiamäärän pienentymiseen tulevaisuudessa.

Verkkoyhtiöt vastaavat omistamansa sähköverkon toiminnasta ja toimittamansa sähkö laadusta. Verkkoyhtiöllä on velvollisuus liittää sähköntuotantolaitos verkkoonsa. Pientuotannon lisääntyessä verkon rakenne muuttuu. Erityistä huomiota tulee kiinnittää verkon turvallisuuteen ja sähkön laatuun. Hajautettu energiantuotanto asettaa haasteita verkostolle ja sen suojaukselle, säätövoimalle ja sähkönlaadulle tuotannon vaihdellessa esim. sääolosuhteiden mukana. Sähköntuotantolaitos vaikuttaa verkon jännitteeseen, vikavirtoihin ja suojaukseen.

Yleisimpiä pientuotantolaitostyypppejä ovat tuulivoimalat, aurinkovoimalat ja pienikokoiset biopolttolaitokset. Näistä erityisesti aurinkovoimalat ovat kasvattaneet viime aikoina suosiotaan taloudellisen kannattavuuden parantumisen seurauksena. Aurinkovoimaloiden oletetaan olevan yleisin pienvoimalaitostyyppi. Tässä työssä keskitytään aurinkovoimaloihin, jotka on liitetty yleiseen sähkönjakeluverkkoon.

Yksittäinen mikrovoimalaitos harvoin aiheuttaa ongelmia sähköverkon kannalta. Jokainen mikrovoimalaitos kuitenkin vaikuttaa verkon toimintaan. Tilanne muuttuu, kun mikrovoimalaitosten määrä verkossa kasvaa. Verkkoyhtiön on liitettävä pienimuotoinen sähköntuotanto verkkoonsa. Verkkoyhtiö ei saa sisällyttää liittämisen seurauksena aiheutuvia verkon vahvistamisesta aiheutuvia kustannuksia liittymismaksuun. Verkkoyhtiöiden tulee ennakoida mikrovoimalaitosten merkitys verkkonsa eri osille. Tarkastelua tulee tehdä sekä toiminnallisuuden, taloudellisuuden että sähköturvallisuuden kannalta.

2 SÄHKÖNJAKELUVERKON SUUNNITTELU

Sähkönjakeluverkon suunnittelussa on pitkän ja lyhyen aikavälin tavoitteita. Verkoston pitkän aikavälin suunnittelun kannalta keskeistä ovat erilaiset ennusteet kuormituksen muutoksista ja muutosnopeudesta. Suunnitteluun vaikuttavat olemassa olevan verkon tila, tulevaisuuden tavoitteet ja mahdolliset muutostarpeet. Suunnittelun tavoitteena on saada aikaan toimiva verkko ja minimoida verkon kustannukset suunnittelujakson aikana. Verkon kustannukset muodostuvat investoinnista, verkostohäviöistä, keskeytyskustannuksista sekä käyttö- ja kunnossapitokustannuksista. Suunnitteluun vaikuttavat tekniset reunaehdot, joita ovat verkon komponenttien terminen kestoisuus, oikosulkukestoisuus, jännitteenalenema normaali- ja häiriötilassa sekä sähkön laatutekijät. (Repo, Laaksonen, Mäkinen & Järventausta 2003.)

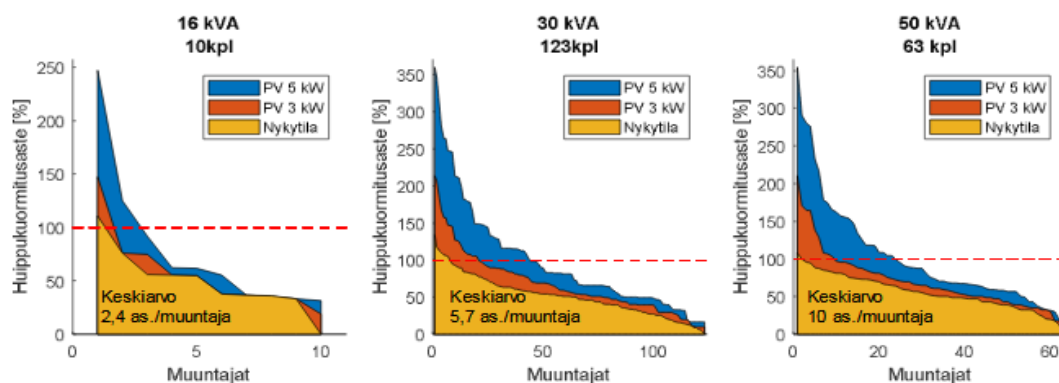
Suurimmat kustannusvaikutukset verkkoyhtiön kannalta muodostuvat investoinnista, käytöstä ja kunnossapidosta, ei niinkään keskeytyksistä tai jännitehäviöistä. Muutokset sähkön käytössä ja tuotannossa aiheuttavat haasteita verkkoyhtiöille. Verkkoyhtiöiden taloudellinen sääntely, verkon luotettavuuden parantaminen, automaation lisääntyminen, maakaapelointi, kasvava palvelutarjonta, asiakkaiden vaatimukset ja uudet teknologiat vaikuttavat verkkoliiketoimintaan ja sen kannattavuuteen. Käytössä olevilla ennustemalleilla ei pystytä saamaan riittävää tietoa tulevaisuuden verkoista. Tämän vuoksi tarvitaan uusia kuormitusmalleja, joilla voidaan arvioida investointeja. (Tuunanen 2014.)

Verkostosuunnittelussa lähtökohtana on ollut maksimaalinen tehonkulutus. Tämä ajoittuu suurimmassa osassa liittymiä talvikuukausille, kun sähköä käytetään lämmitykseen. Toinen mitoituksen lähtökohta on verkon turvallisuus ja jännitteenalenema. Jännitteen liityntäpisteessä täytyy pysyä standardin SFS-EN 50160 vaatimusten mukaisena.

Verkossa, johon on liitetty hajautettua tuotantoa, täytyy suunnittelussa huomioida erityisesti kaksi ääritilannetta. Ensimmäisessä tilanteessa verkon kuormitus on maksimaalista, mutta pientuotanto on irti verkosta. Tämä on verkon jännitteen aleneman kannalta hankalin tilanne. Toisaalta ongelmallinen on ääritilan-

ne, jossa hajautettu tuotanto on maksimaalista kulutuksen ollessa minimissään. Tällaisessa tilanteessa jännitteen nousu verkossa saattaa muodostua ongelmaksi. Aurinkovoimalaitosten osalta tällainen tilanne on kesällä aurinkoisena päivänä. Tällöin kulutuksen määrä on pientä ja samanaikaisesti tuotanto on maksimaalista. Jännitteenousu voi olla ongelma verkossa, jossa verkon jäykyyteen nähden suuri tuotantoyksikkö tai useita pieniä yksiköitä liitettäisiin verkkoon ja niiden tuotanto on maksimaalista. (Repo ym. 2003.) Nyrkkisääntönä pidetään, että verkon osaan voidaan liittää tuotantoa määrä, joka vastaa muuntopiirin muuntajan tehoa.

Hajautetun tuotannon liittäminen verkkoon voi muuttaa tilannetta siten, että tehon suunta muuttuu, siirrettävä teho on aiempaa suurempaa (Kuva KUVA 1), tehon siirtotarve on enemmän samanaikaista (ei ns. risteilyä muuntopiirin alueella) ja maksimitehон ajankohta vaihtuu kesäkuukausille, jolloin aurinkosähkön tuotanto on maksimaalista. Vaikutukset verkostoon ovat riippuvaisia liitettyjen voimaloiden määrästä ja tehosta (Tuunanen 2014; Silventoinen 2018).



KUVA 1. Eri skenaarioita erikokoisten muuntajien kuormittumisesta, kun verkon jokaiseen kulutuspisteeseen ns. mökkialueella on lisätty aurinkosähköjärjestelmä (3 tai 5 kW) sekä tilanne ilman tuotantoa (Muokattu: Silventoinen 2018).

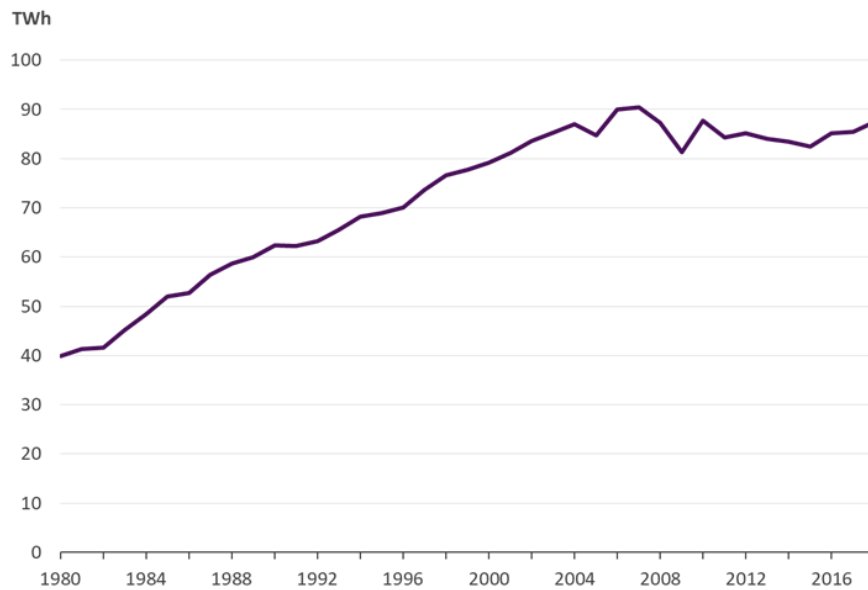
Hajautettu tuotanto voi pienentää jakeluverkkoyhtiön käyttökustannuksia. Pientuotannon tuottama teho voi vaikuttaa verkkoyhtiön maksamaan kantaverkkomaksuun laskevasti. Vaikutus on sitä suurempi, mitä enemmän pientuotantoa on ja kuinka paljon pientuotannolla voidaan korvata huippukuormituksen aikais-
ta tehoa. Myös verkossa tapahtuvien häviöiden määrä pienenee, kun verkkoon

on liitetty pientuotantoa. Käytönvalvonnan kustannusten arvioiminen on vaikeampaa, mutta kustannukset voivat nousta lisääntyvän seurannan ja uudelleenasettelujen seurauksena. (Repo ym. 2003.)

3 SÄHKÖNTUOTANTO JA -KULUTUS SUOMESSA

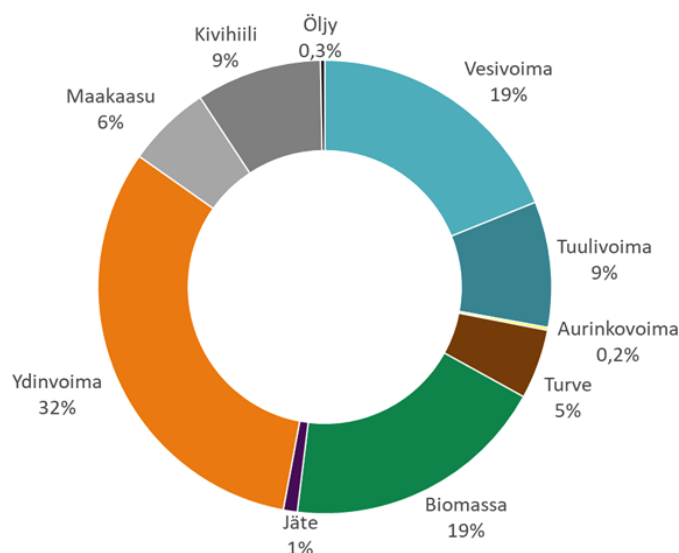
Ympäristöarvot ohjaavat yhä enemmän yhteiskuntien toimintoja. Suomessa on tavoitteena päästä tilanteeseen, jossa yhteiskunta olisi ns. hiilineutraali. Arvioiden mukaan hiilineutraaliteetti olisi mahdollista saavuttaa jo vuoteen 2040 mennessä (Koljonen, Soimakallio & Hilden 2019, 127). Suomi on erittäin riippuvainen energiasta, ja energiankulutus henkeä kohden on korkea. Hiilineutraaliteettitavoitteen saavuttamiseksi tulee tehdä monipuolisia ratkaisuja niin energiantuotannossa kuin -kulutuksessa useilla eri tasoilla. (TEM 2014a.) Hajautettu energian pientuotanto on osa ratkaisua.

Suomessa sähkön kokonaiskulutus vuonna 2018 oli 87 TWh (KUVA 2). Käytöstä sähköstä 67 TWh tuotettiin Suomessa (KUVA 3) (Sener 2019a). Sähkönkulutus ja -tuotanto ovat kasvaneet ja näin oletetaan tapahtuvan myös tulevaisuudessa, koska yhteiskunta on yhä riippuvaisempi sähköstä. Suomen sähkönkulutuksen oletetaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä 92 TWh:iin, ja vuoteen 2050 mennessä 100 TWh:iin. Merkittävimmät sähkönkulutukseen vaikuttavat tekijät ovat arvioiden mukaan yhteiskunnan digitalisoituminen, liikenteen sähköistyminen ja teollisuuden prosessien sähköistäminen. (TEM 2019.)

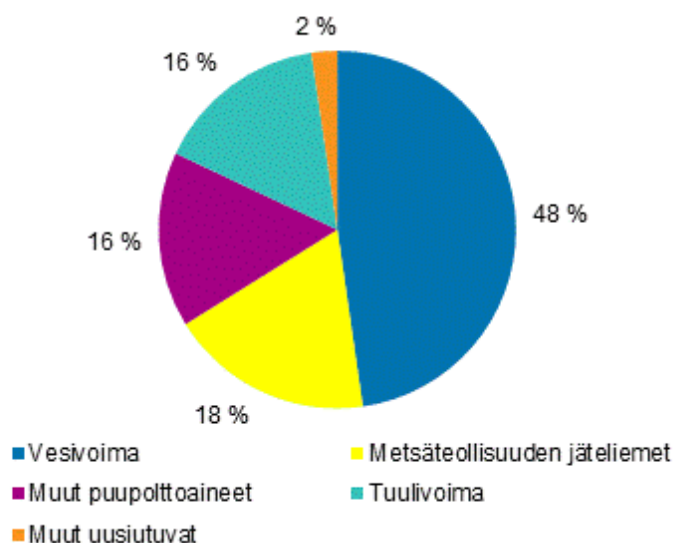


KUVA 2. Sähkön kokonaiskäyttö Suomessa vuosina 1980 - 2018 (Sener 2019a).

Sähkönkulutuksesta 77 % katettiin kotimaisella tuotannolla ja loput sähköstä tuotiin ulkomailta (Pohjoismaat, Venäjä ja Viro). Kotimaisesta sähköntuotannosta uusiutuvilla energialähteillä katettiin 47 %, joka tarkoittaa 30,7 TWh:a energiaa (KUVA 3). Uusiutuvilla energialähteillä tuotetusta sähköstä puolet tuotettiin vesivoimalla, 16 % tuulivoimalla ja loppuosa lähes pääosin puuperäisillä polttoaineilla (KUVA 4). (Sener 2019a.)



KUVA 3. Sähkön tuotannon kokonaismäärä Suomessa vuonna 2018 oli 67 TWh. Uusiutuvilla energianlähteillä tuotettiin 30,7 TWh. (Sener 2019a.)



KUVA 4. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön jakautuminen eri tuotantomuotojen välillä vuonna 2017 (Tilastokeskus 2018).

Energiatehokkuuden parantamisen ja uusiutuvan energian lisäämisen seurauksena Suomen sähkönhankinnan omavaraisuuden oletetaan kasvavan tulevaisuudessa (TAULUKKO 1). Erilaisten vuoteen 2050 ulottuvien skenaarioiden perusteella bioenergian osuudeksi arvioidaan 52 - 65 TWh, tuulivoiman 7 - 29 TWh ja aurinkosähkön 0.2 - 18 TWh. Koska energiankulutushuiput Suomessa ajoittuvat talviaikaan, liittyy aurinkosähkön käyttöön epävarmuustekijöitä. Suo-

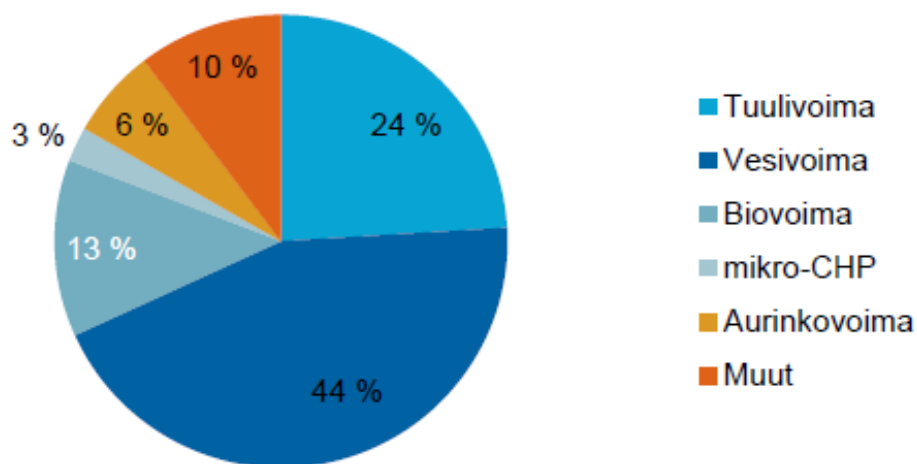
men tavoitteena on olla omavarainen sähköntuotantokyvyssä vuositasolla mitattuna (TEM 2014a).

TAULUKKO 1 Suomen sähkötaseen mahdollinen kehitys vuoteen 2050 saakka. Suomen sähkötaseen oletetaan muuttuvan sähkönostajasta myyjäksi jo vuonna 2030. (TEM 2019.)

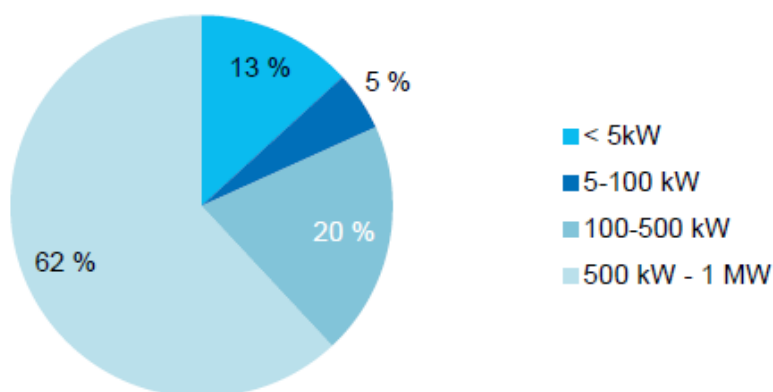
	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Vesivoima	14.6	14.4	15.0	15.0	14.9	14.9	15.0	15.2
Ydinvoima	21.5	34.6	34.4	43.3	43.3	37.0	34.8	20.5
Lämpövoima	23.9	23.7	21.6	21.1	20.1	19.6	19.4	19.1
Tuulivoima	4.7	8.5	14.0	18.7	22.2	27.1	32.7	37.0
Aurinkovoima	0.0	0.0	0.3	1.1	2.1	3.2	4.5	6.0
Tuotanto	64.7	81.2	85.4	99.2	102.4	101.8	106.4	97.8
Nettotuonti	18.8	7.2	4.9	-7.1	-8.1	-4.8	-7.6	2.2
Norja	0.1	0.2	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	0.2
Ruotsi	15.8	3.2	2.4	-7.1	-7.6	-4.7	-7.9	0.0
Viro	-0.8	-3.3	-4.6	-6.4	-6.2	-5.6	-5.3	-3.6
Venäjä	5.8	7.0	6.9	6.3	5.6	5.4	5.5	5.6
Kulutus	85.1	88.4	90.3	92.1	94.3	97.0	98.8	100.0

4 SÄHKÖN PIENTUOTANTO SUOMESSA

Energiaviraston vuonna 2015 kyselytutkimuksena tekemän selvityksen mukaan verkkoon kytkettyä pientuotantokapasiteettia (alle 1 MW:n voimalaitokset) oli Suomessa yhteensä 120 MW. Suurin osa pientuotannosta on vesivoimaa (KUVA 5), ja tuotantolaitokset ovat pääosin teholtaan yli 500 kW (KUVA 6). (Pöyry Management Consulting Oy 2017.)

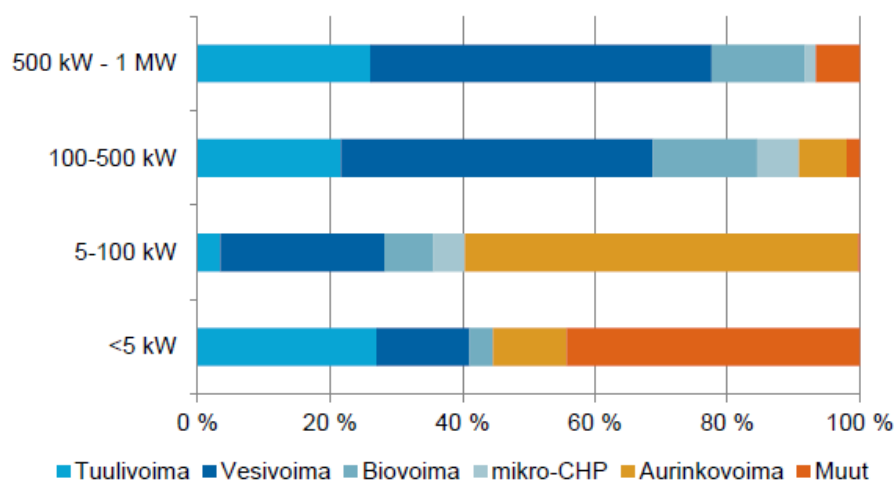


KUVA 5. Eri tuotantomuotojen osuudet sähkön pientuotannossa (< 1 MW) (Pöyry Management Consulting Oy 2017).

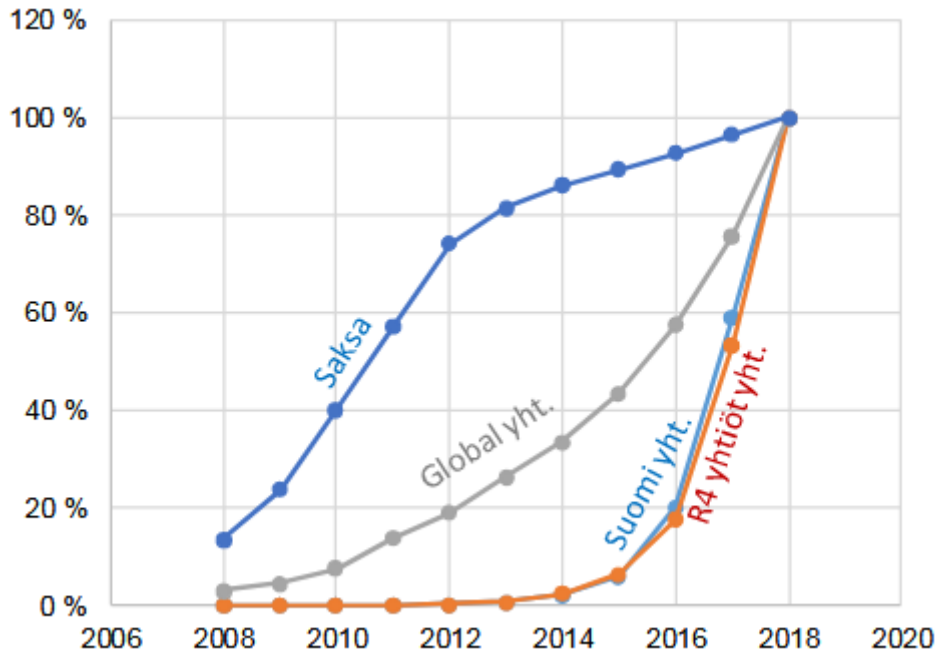


KUVA 6. Sähkön pientuotannon jakautuminen eri voimalaitosten kokoluokkiin (Pöyry Management Consulting Oy 2017).

Voimalaitosten sähköntuotantomuotojen välillä on huomattavia eroja riippuen kokoluokasta. Suuremmissa kokoluokissa vesivoimaloiden osuus kasvaa kokonaismäärästä. Aurinkovoiman osuus on merkittäväintä pienissä alle 100 kW:n voimaloissa (KUVA 7). Kotitalouskohtaista sähköntuotantokapasiteettia oli vuonna 2015 pienimmissä kokoluokissa vain vähän. Pientuotannon määrä on kasvanut viime vuosina voimakkaasti (KUVA 8) ja kasvun oletetaan jatkuvan tulevaisuudessa nopeasti (KUVA 9).

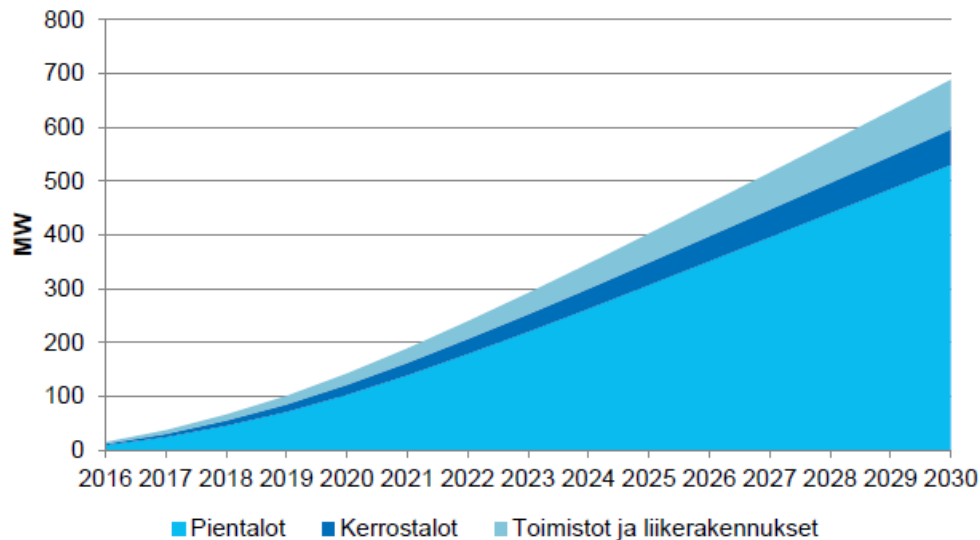


KUVA 7. Sähkön tuotantomuotojen osuudet eri kokoluokissa. Jaottelu tehty tuotantotehon mukaan. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.)



KUVA 8. Aurinkosähkövoimaloiden lukumäärän kehitys maailmassa. Kuvaajassa on esitetty asennettu aurinkosähkökapasiteetti suhteessa vuoden 2018 kapasiteettiin Saksassa, koko maailmassa ja Suomessa. R4 yhtiöt ovat sähköverkon omistajia: Järvi - Suomen Energia Oy, Kymenlaakson Sähköverkko Oy, PKS Sähkönsiirto Oy ja SavonVoima Verkko Oy. (Lassila, Haakana, Haapaniemi, Räisänen & Partanen 2019.)

Aurinkosähkön tuotantokapasiteetin oletetaan vuonna 2030 olevan 700 MW. Tämä kapasiteettimäärä tuottaisi vuositasolla noin 600 - 700 GWh sähköä. Eri-tyisesti pientalojen kiinteistökohtaisen aurinkosähkön tuotannon oletetaan yleistyvän merkittävästi KUVA 9. Katolle sijoitettavien aurinkopaneelien arvioitu kapasiteettikehitys vuosina 2016 - 2030. On huomattava, että arvio tehty ilman tukijärjestelmiä. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.). Tämä on seurausta aurinkosähköinvestoinnin kannattavuuden parantumisesta, teknisestä kehityksestä sekä käytettävissä olevasta helposti hyödynnettävästä asennuspinta-alasta. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.) Pientuotannon määrän verkossa siirretystä energiasta oletetaan vuonna 2030 olevan 2,5 - 12 %, ja aurinkosähkölaitteita olisi 10 - 49 % pienjännitekäyttöpaikoista (Lassila ym. 2019).



KUVA 9. Katolle sijoitettavien aurinkopaneelien arvioitu kapasiteettikehitys vuosina 2016 - 2030. On huomattava, että arvio tehty ilman tukijärjestelmiä. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.)

Pientuotannon lisääntymiseen vaikuttaa sähkön hinta. Sähkön kokonaishinnan ollessa korkea, nähdään oma sähköntuotanto kannattavana investointina ja houkuttelevana vaihtoehtona. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.) Pientuotannon kannattavuuteen vaikuttavia seikkoja käsitellään myöhemmin tässä työssä.

Sähkön pientuotantoon vaikuttavat myös ei-taloudelliset seikat. Tällaisia ovat mm. eettiset ja ympäristötekijät. Pöyryn raportin (Pöyry Management Consulting Oy 2017) mukaan eri tutkimuksissa on todettu, että pienimuotoisen energian tuottajaksi ryhtymiseen vaikuttavat myös ns. demografiset tekijät (mm. ikä, sukupuoli, tulotaso ja koulutus) sekä muut tekijät kuten arvomaailma, elämäntilanne ja sosiaaliset vertaisverkot.

4.1 Mikrotuotanto

Sähkön mikrotuotantoa on monenlaista, mutta tässä työssä keskitytään aurinkovoimaan. Tämä rajaus on tehty oletettavan tuotantoyksikkömäärän kautta: aurinkopaneelit ovat suhteellisen helposti saatavilla ja asennettavissa, ja ne ovat tekniikaltaan yksinkertaisia ja käyttökelpoisia useimmille. Aurinkosähkön ja erityisesti noin 5 kW kokoisten tuotantoyksiköiden oletetaan olevan suosituin

mikrovoimalaitos tulevaisuudessa (Tuunanen 2014). Aurinkopaneelien sijoittamiseen tarvitaan maankäyttö- ja rakennuslain mukaan toimenpidelupa vain asennuksissa, jotka vaikuttavat merkittävästi kaupunkikuvaan tai ympäristöön. Pienimuotoisen energiantuotannon aurinkopaneeleilla katsotaan yleensä olevan vaikutuksiltaan ja merkitykseltään vähäistä. Rakentamisen kannalta lupaprosessi on siis suhteellisen kevyt. Näiden syiden vuoksi työstä on rajattu pois muut voimalaitostyypit.

Sähkömarkkinalaissa pienimuotoiseksi sähköntuotannoksi katsotaan voimalaitos tai voimalaitosten kokonaisuus, jonka teho on enintään 2 MVA (Sähkömarkkinalaki 2013). Toisaalta mikrotuotantolaitoksen maksimitehoksi on joissain tilanteissa määritelty myös 100 kVA, joka on siis paljon pienempi tehoarvo (Energiateollisuus 2016). Tämän työn lähtökohtana ovat teholtaan sellaiset laitteistot, joita voidaan ajatella otettavan käyttöön pääasiassa pientaloissa. Tässä työssä mikrotuotannolla tarkoitetaan Suomen Energiateollisuuden (SENER) määritelmän ja standardin SFS-EN 50549-1 mukaista tuotantoyksikköä. Näiden mukaisesti tässä työssä käsiteltävällä tuotantoyksiköllä tuotetaan sähköenergiaa pääasiassa kulutuskohteen omaan käyttöön ja sen teho on enintään 50 kVA kolmivaiheisena (Sesko ry 2015).

Aurinkosähkön teoreettinen tuotantopotentiaalikapasiteetti Suomessa voi olla yli 14 GW, mutta kehityksen arvioiminen on vaikeaa. On esitetty, että vuonna 2030 aurinkosähkötuotantokapasiteettia voisi olla n. 700 MW (KUVA 9). Tällä kapasiteettimäärällä voitaisiin tuottaa sähköä vuodessa noin 600 - 700 GWh, joka vastaisi 0,7 - 0,8 % Suomen sähkön kokonaiskulutuksesta. Aurinkosähkön päätuotannon ajoittuminen keväästä syksyyn aiheuttaa sen, että aurinkosähköntuotannon ja sähkön kulutuksen huippuhetket eivät ole samanaikaisia. Aurinkosähkötuotanto lisää sähkön säätökapasiteetin tarvetta, koska aurinkosähkötuotanto on vaihtelevaa ja säätämätöntä. Säätökapasiteetin tarpeen voidaan kuitenkin olettaa olevan arvioidulla sähköntuotantopotentiaalilla merkitykseltään vähäinen, sillä esimerkiksi tuulivoiman tuotanto olisi edelleen moninkertaista aurinkosähköön verrattuna. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.)

Vaikka aurinkosähköjärjestelmät yleistyisivät rohkeimpien skenaarioiden mukaisesti, olisi määrä edelleen marginaalista siirron kokonaisvolyymiin nähden.

Pääosin aurinkosähköjärjestelmien tehojen oletetaan olevan pieniä suhteessa talviaikaiseen huippukulutukseen ja liittymien sulakekokoon. Kuitenkin järjestelmien yleistyessä tuotannon samanaikaisuus samassa muuntopiirissä voi johtaa ongelmiin jännitteen laadussa ja verkon komponenttien ylikuormittumiseen (Lassila ym. 2019).

4.2 Sähköntuotantolaitosten luokittelu

Sähköntuotantolaitokset voidaan jakaa toimintaperiaatteidensa mukaisesti eri luokkiin (TAULUKKO 2). Luokan 1 ja 2 voimalaitokset ovat yleisestä sähköjakeluverkosta erillään käyviä voimalaitoksia. Näiden voimalaitosten rinnankäyttö yleisen verkon kanssa on estetty mekaanisella kytkimellä (luokka 1) tai rajoitettu automaattisella syötönvaihdolla (luokka 2). Luokan 2 sähköntuotantolaitoksen ja yleisen jakeluverkon rinnankäyntiaika tulee olla rajattu releautomaatiikalla viiteen sekuntiin. Luokan 3 ja 4 tuotantolaitokset ovat yleisen sähköverkon kanssa rinnankäyviä. Luokan 3a tuotantolaitoksella on sähkönsiirto yleiseen verkkoon estetty joko kokonaan tai vähentämällä generaattorin tehoa alle viidessä sekunnissa tilanteessa, jossa sähköä siirtyisi yleiseen verkkoon. Luokan 3b ja luokan 4 laitteistoilta on sallittua siirtää sähköä yleiseen verkkoon. Luokan 3b osalta sähköntuottaja ei saa korvausta verkkoon siirretystä sähköstä. Luokan 4 tuotantolaitokselta myydään sähköä sähkömarkkinoille. (Sener 2016.) Tässä työssä käsitellään luokkien 3b ja 4 voimalaitoksia.

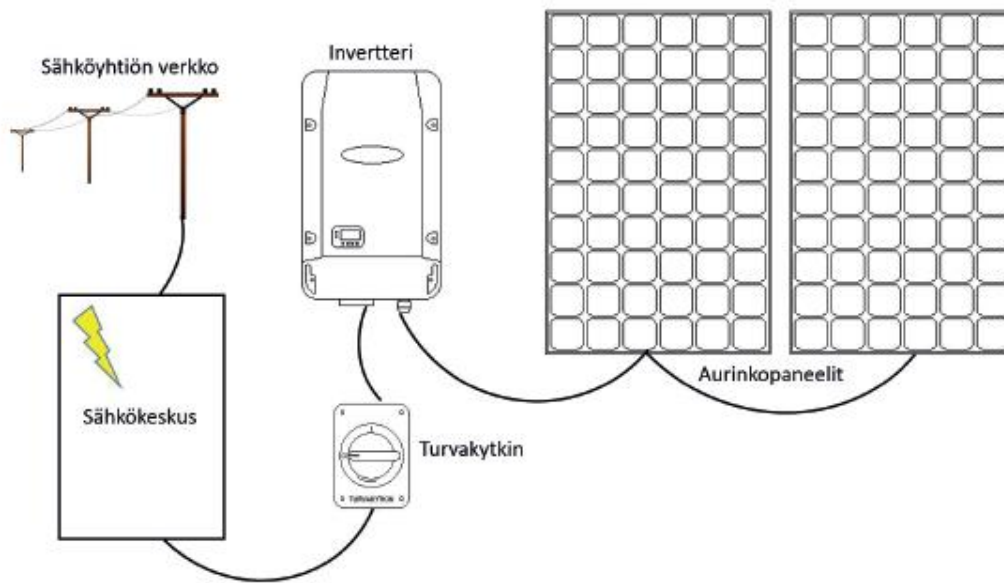
TAULUKKO 2. Sähköntuotantolaitosten luokittelu käyttötavan ja -tarkoituksen mukaisesti (Muokattu Sener 2019a). LE= Liittymisehdot, VPE = Verkkopalveluehdot.

			Luokka	Rinnan- käynnin esto	Tahdistus	Yhteen- sopivuus	Saareke- käytön esto	Sopimus- ehdot
Yleisestä jakeluverkosta erossa käyvät tuotanto- laitteistot	Rinnankäyttö estetty mekaanisella kytkimellä		1	x				LE 2019 ja VPE 2019
	Rinnankäyttö rajoitettu automaattisella syötönvaihdolla		2	x	x			LE 2019 ja VPE 2019
Yleisen jakeluverkon kanssa rinnankäyvät tuotanto- laitteistot	Sähkönsiirto jakeluverkkoon estetty		3a		x	x	x	LE 2019 ja VPE 2019
	Sähkönsiirto jakeluverkkoon sallittu	Tuottaja ei saa korvausta verkkoon siirtyneestä sähköstä (vain pienet mikrogeneraattorit)	3b		x	x	x	LE 2019 ja VPE 2019
		Tuottaja myy sähköä muulle sähkökaupan markkinaosapuolelle.	4		x	x	x	LE 2019 ja VPE 2019

4.3 Aurinkosähköjärjestelmän osat

Luokkien 3b ja 4 voimalaitoksilta siirretään sähköä jakeluverkkoon. Tällaisissa järjestelmissä ei yleensä ole akkuja, vaan tuotettu sähkö pyritään hyödyntämään omassa käytössä tai siirretään yleiseen verkkoon. Tuotantolaitokset ovat yleensä kolmivaiheisia, mutta pienimmät mikrovoimalaitokset voidaan kytkeä verkkoon myös yksivaiheisena. Yksivaiheinen tuotantolaitos suositellaan kytkettäväksi korkeintaan 16 A sulakesuojauksen taakse, joten 1-vaihejärjestelmän maksimiteho olisi 3,7 kVA. Suuremmat kuin 3,7 kVA:n voimalaitokset suositellaan kytkemään 3-vaiheisina. (Sener 2016) Pientalojen aurinkosähköjärjestelmät ovat tyypillisesti 3 - 5 kW, mutta yhä isompia järjestelmiä asennetaan. Tämän kokoluokan oletetaan olevan myös tulevaisuudessa yleisin (Tuunanen 2014).

Verkon rinnalla käyvä laitteisto (ns. On-grid) on jatkuvasti verkkoon liitetty. Yleiseen jakeluverkkoon liitetyn järjestelmän keskeiset osat ovat aurinkopaneelit ja verkkoon syöttävä vaihtosuuntaaja (invertteri) (KUVA 10). Järjestelmässä aurinkopaneelit tuottavat tasasähköä, joka muutetaan vaihtosuuntaajalla vaihtosähköksi.



KUVA 10. Verkkoon liitetyn sähkön mikrotuotantojärjestelmän periaatekuva. Sähkön mikrotuotantolaitteisto on erotettava yleisestä verkosta turvakytkimellä. (Lehto, Liuksiala, Lähde, Olenius, Orrberg & Ylinen 2017.)

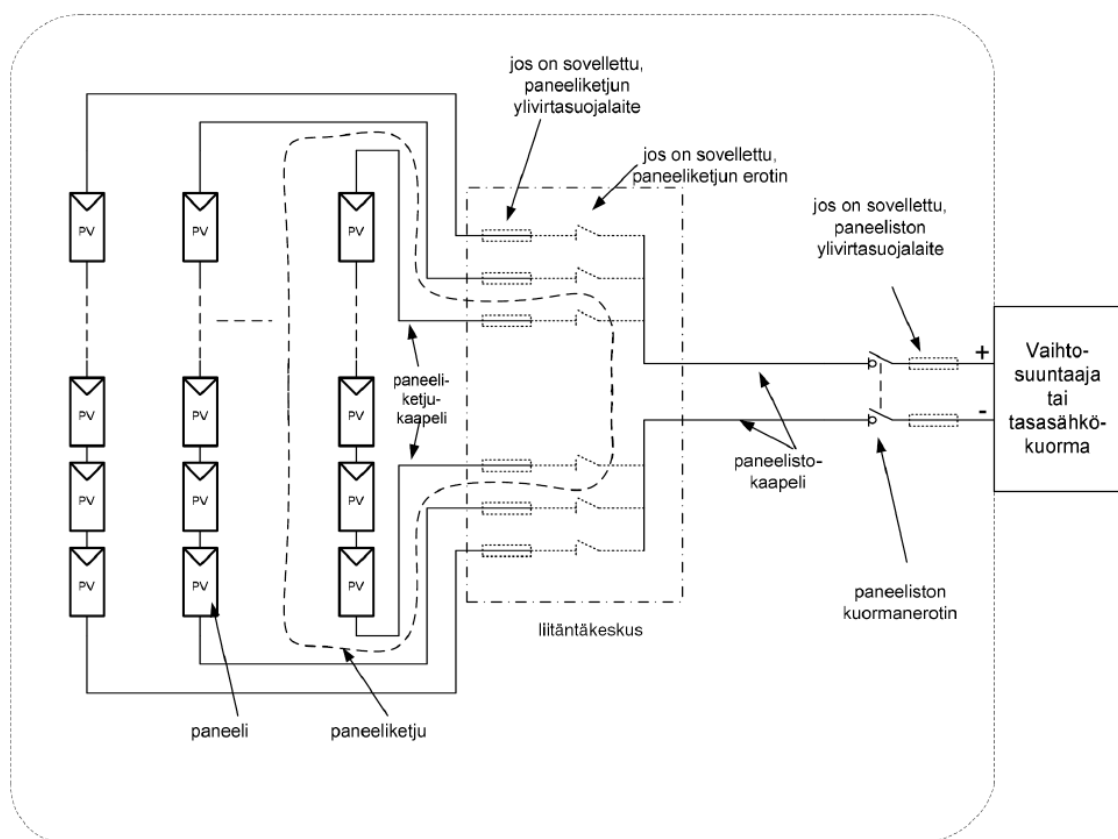
4.3.1 Aurinkopaneelit

Sähköntuotanto aurinkopaneeleilla perustuu auringon säteilyyn, valosähköiseen ilmiöön ja erilaisten puolijohdemateriaalien ominaisuuksiin. Valosähköisellä ilmiöllä tarkoitetaan tapahtumaa, jossa auringon säteilyn seurauksena alkuaineen pinnalta irtoaa elektroni. Irrottautumiseen vaadittava energia on peräisin auringosta saapuvasta fotonista. Fotonin energia siirtyy elektronille, ja elektronin liikkuminen saa aikaan sähkövirran syntymisen.

Yleisimpiä käytössä olevia aurinkokennosovelluksia ovat yksi- ja monikiteiset piikennot, ohutkalvotekniikat ja orgaaniset kennot. Eri kennotyypit eroavat toisistaan mm. materiaalin, hyötysuhteen, kestävyys ja hinnan perusteella (TAULUKKO 3). Aurinkopaneelit muodostuvat yhteen liitetystä aurinkokennoista. Yksittäisen kennon jännite on n. 0,5 V. Kennoja sarjaan kytkemällä saadaan aikaan haluttu jännitetaso (KUVA 11). Yksittäisen aurinkopaneelin pinta-ala on tavallisesti noin 1,5 m². Tällä pinta-alalla saadaan aikaan nimellisteho 200 - 250 Wp. Tavanomaiseen 2 kWp:n järjestelmään sisältyy 8 - 10 paneelia, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on noin 12 - 15 m².

TAULUKKO 3. Eri yleisesti käytettyjen kennotyyppien ominaisuuksia (Lehto ym. 2017).

Ominaisuudet	Kiteinen pii		Ohutkalvo			Orgaaninen
	Monikiteinen	Yksikiteinen	Amorfinen pii	CIS/CIGS	CdTe	
Hyötysuhde (%)	13–16 %	15–20 %	5–10 %	7–16 %	7–16 %	3–5 %
Lämpötilan vaikutus (STC) tehoon (% / +1 °C)	–0,42	–0,40	–0,1...–0,3	–0,35...–0,40	–0,25...–0,36	...
Mekaaninen kestävyys	hauras	hauras	joustava	joustava	joustava	joustava
Varjostus	herkkä	herkkä	sietää	sietää	sietää	sietää
Käyttöikä (vuotta)	30+	30+	30+	30+	30+	0,5–3
Hinta	€€	€€€	€€€	€€€	€€€	€



Selite

- Komponentit, joita ei tarvita kaikissa tapauksissa
- - - Laitekotelo
- - - Järjestelmän tai alijärjestelmän raja

KUVA 11. Esimerkki kuva aurinkosähkölaitteistosta, jossa on yksi tai useampi paneeliketju (SFS 6000-7-712:2017).

Paneelien tuottama teho on riippuvainen mm. käytetystä materiaalista, auringon säteilyn määrästä (sijainti, asemointi: suuntaus ja kallistus, varjostus) ja lämpötilasta. Eri säätötekniikoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi aurinkosähköjärjestelmän hyötysuhteeseen. Säätötekniikkaa, jossa paneeliston ominaisuuksia mitataan jatkuvasti, ja toimintajännitteen mukauttamisella pyritään parhaimman hyötysuhteen saavuttamiseen, kutsutaan MPPT-säädöksi (Maximum Power Point Tracking). Vähemmän kehittyneitä säätötekniikoita ovat mm. karkea on/off-ohjaus ja PWM-säätö (Pulse Width Modulation). Eri tekniikoiden välillä on eroja investointikustannuksissa, mutta toisaalta myös eroja hyötysuhteessa ja järjestelmän kestoisuudessa. (Lehto ym. 2017.)

4.3.2 Invertteri

Invertterilaitteelta vaaditaan sähkönlaadun ja turvallisuuden kannalta standardien vaatimusten täyttämistä. Sähköteknisesti invertteri on vaihtosuuntaaja, joka muuttaa aurinkopaneeleista saatavan tasasähkön vaihtosähköksi. Puhekielessä kuitenkin aurinkosähköjärjestelmän osasta, joihin aurinkopaneelit kytketään, käytetään nimitystä invertteri. Tilanteesta ja käytettävästä kokoonpanosta riippuen invertterillä voidaan tarkoittaa eri asioita. Yleisesti invertterillä tarkoitetaan keskuslaitetta, jossa sijaitsevat aurinkosähköjärjestelmän kannalta tärkeimmät toiminnot. Tällaisia toimintoja ovat itse vaihtosuuntaajan lisäksi mm. erilaiset säätimet, sähkönjakelun lähdöt ja suojaukset, eri piirien kytkin- ja erotuslaitteet sekä suojalaitteet henkilösuojauksen ja sähkönlaadun kannalta. (Lehto ym. 2017.)

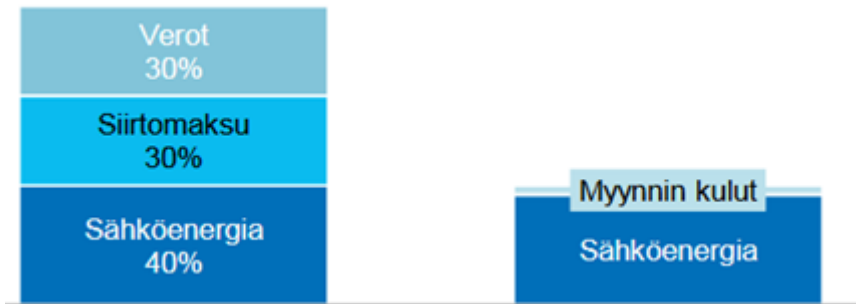
5 MIKROTUOTANNON TALOUDELLISET KANNUSTIMET

Pien- ja mikrotuotannon merkittävimmät haasteet tuottajan kannalta liittyvät tuotannon kannattavuuteen, markkinoille pääsyyn ja yleiseen tietotasoon mahdollisuuksista (TEM 2014b). Vaikka pientuotannon käyttöönotto on riippuvaista myös ei-taloudellisista syistä, voidaan kannattavuuden olettaa olevan merkittävä investointipäätöskriteeri. Sähkön pientuotannon taloudellinen kannattavuus on riippuvaista erityisesti kolmesta tekijästä: investoinnin alkukustannuksesta, investoinnin kautta saadusta kustannussäästöstä sekä korkokannasta. Pientuotannon taloudelliset kannustimet voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen: investointitukiin ja verokannustimiin. Sähköntuotannon mikrokokoluokassa kyseeseen tulee verokannuste kotitalousvähennyksen muodossa. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.)

Mikrokokoluokan sähköntuotannon vuotuinen kustannussäästö muodostuu ostettavan sähkön korvaamisesta omalla tuotannolla, sähkön siirtomaksujen energiaperusteisen kustannuksen sekä verojen välttämällä (

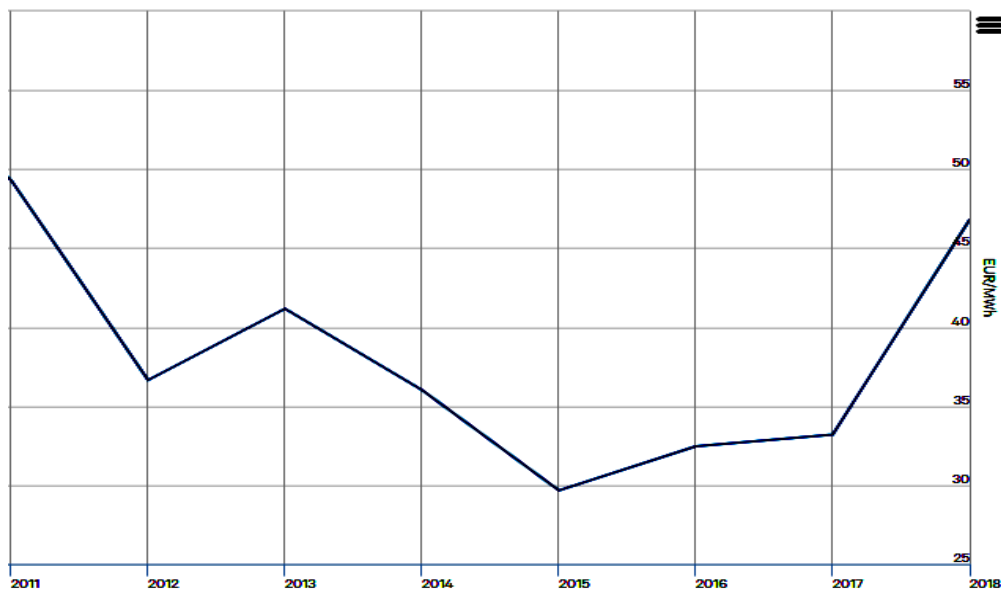


KUVA 12).



KUVA 12. Sähkön osto- ja myyntihintojen muodostuminen. Vasemmalla ns. pistorasiahinta, joka muodostuu veroista, siirtomaksusta ja energiasta. Oikealla on esitetty pientuotannon sähkön myynnistä saatavat tulot. Sähkön ostamisen välttäminen on kannattavampaa kuin ylijäämänsähkön myyminen. (Pöyry Management Consulting Oy 2017.)

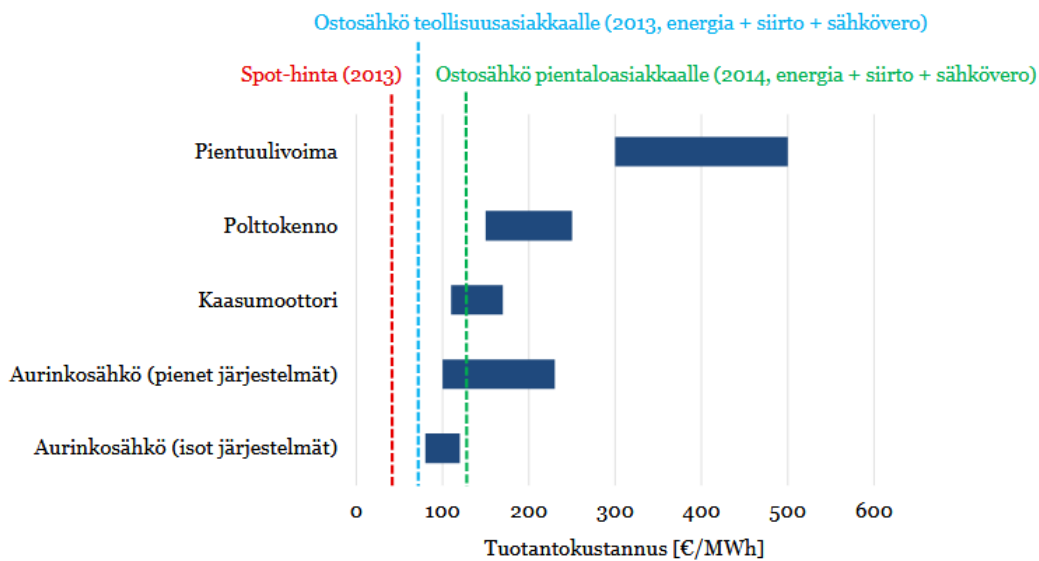
Merkittävä pientuotannon lisääntymistä rajoittava tekijä on ollut tukkusähkön (Spot -sähkö) alhainen hinta. Hinta on ollut pääosin alle 40 €/MWh vuosina 2012 - 2018 (KUVA 13).



KUVA 13. Pohjoismaisen Spot -pörssisähkön vuosittainen hintakehitys 2011 - 2018 (Nordpoolgroup 2019).

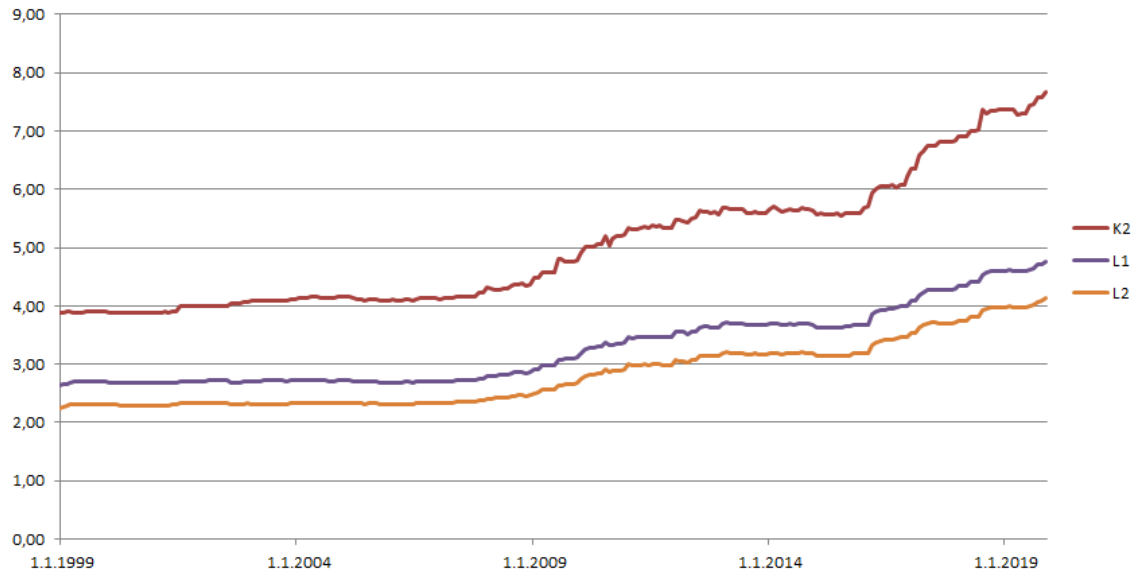
Eri pientuotantomuotojen kustannuksia verrattuna sähkön Spot -hintaan vuonna 2013 on esitetty alla olevassa kuvassa KUVA 14. Kuvasta huomataan, että säh-

kön spot -hintaa on ollut alhainen, ja näin pienkuluttajan ostosähkön hinta on pysynyt matalalla (TEM 2014).



KUVA 14. Eri pientuotantomuotojen kustannuksia verrattuna markkinasähkön (Spot) ja ostosähkön hintaan vuonna 2013. Ostosähkö sisältää energian, siirron ja sähköveron, ei arvonlisäveroa. (TEM 2014b.)

Siirtohintaa muodostaa merkittävän osan sähkön kokonaishinnasta. Sähkön siirtohintaa on verkkoyhtiökohtaista. Siirtohinnat ovat nousseet viime vuosina (KUVA 15).



KUVA 15. Sähköenergian siirron hinnan kehitys 1999 - 2020. Kuvassa on esitetty sähkön siirtohinnan (snt/kWh) koko maan painotettu keskiarvo. Siirtohintoihin ei ole lisätty sähköveroa. K2 Pientalo, sähkökiuas, ei sähkölämmitystä, pääsulake 3x25 A, sähkön käyttö 5 000 kWh/vuosi. L1 Pientalo, huonekohtainen sähkölämmitys, pääsulake 3x25 A, sähkön käyttö 18 000 kWh/vuosi. L2 Pientalo, osittain varaava sähkölämmitys, pääsulake 3x25 A, sähkön käyttö 20 000 kWh/vuosi. (Muokattu: Energiavirasto 2020.)

5.1 Tuotannon mittaus ja myynti markkinoille

Liitettäessä sähkövoimalaitos yleiseen sähköverkkoon on toiminta säänneltyä. Sähkön pientuotantoa käsitellään mm. sähkömarkkinalaissa (588/2013), sähköverolaissa sekä valtioneuvoston asetuksessa sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (VnA 66/2009 ja muutos VnA 217/2016). (Lehto ym.2017) Lisäksi Suomen Energiateollisuus (Sener 2019a, Sener 2019c) on ohjeistanut toimijoita.

Sähköntuotantolaitoksen ollessa pienempi kuin 100 kVA, ei järjestelmä vaadi omaa mittaria, vaan riittää, että sähköyhtiön toimittama etäluettava mittari pys-

tyy mittaamaan erikseen sähköverkosta otetun ja siihen syötetyn energian. Tuotantolaitoksen liittämiseksi yleiseen verkkoon on kuitenkin tehtävä sähkönmyyntisopimus (TAULUKKO 4). (Lehto ym. 2017.)

TAULUKKO 4. Sähkön pientuotantolaitosten mittauksen ja verotuksen vaatimukset eri teholuokissa (Lehto ym.2017, 31).

Huomioitava vaatimus	< 50 kVA (~kWp)	< 100 kVA (~ kWp)	≥ 100 kVA (~kWp)
Mittausasetus: ei erillismittarointia tuotantolaitokselle	×	×	
Mittausasetus: erillismittarointi tuotantolaitokselle			×
Sähkönmyyntisopimus	×	×	×
Sähköverolaki: Vapautus sähköverosta	×	×	
Sähköverolaki: Sähköveroilmoitus ja -maksu			yli 800 MWh/a
Verohallinto: Kotitalouden tuloverotus	×		
Sähkön siirto kiinteistörajojen yli	×	×	×

Mikäli sähkönkulutus kohteessa on tuotantoa pienempää, voidaan ylimääräistä sähköä myydä. Tällöin verkkoyhtiö voi periä siirtomaksun. Siirtomaksun enimmäismäärä on 0,07 c/ kWh (Sähkömarkkinalaki 2013). Yleiseen verkkoon siirrettävälle sähkölle täytyy olla ostaja; sähköä ei saa siirtää verkkoyhtiön verkkoon ilman nimettyä ostajaa. Sähköenergian myyminen on mahdollista eri toimijoille. Eri sähköyhtiöt maksavat pientuotannon sähköstä omien periaatteidensa mukaisesti. Yleisesti yhtiöt ostavat sähköä markkinasähköhintaan (Spot), josta vähennetään välityspalkkio. Mahdollinen välityspalkkio ja sen suuruus ovat yhtiökohtaisia.

5.2 Mittauksen netotus ja nettolaskutus

Pienimuotoinen sähköntuotanto perustuu mittaukseen, jossa sähköverkosta otettu ja siihen syötetty energiamäärä eritellään toisistaan tuntitasolla. Käytännössä sähkömittarin täytyy eritellä tunnin aikana verkosta otettu ja siihen siirretty energiamäärä toisistaan. (VNa 66/2009).

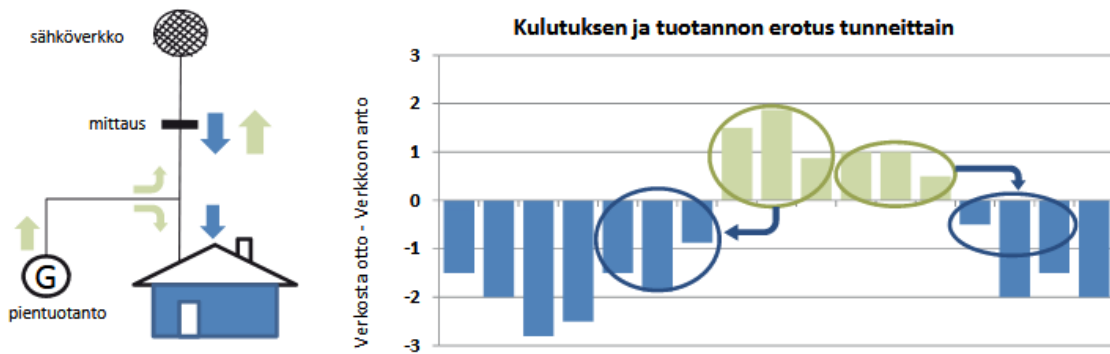
Sähköntuotannon mittauksessa sähköenergian määrää ei saa netota tuntitasolla eli verkkoon siirrettyä energiaa ei saa vähentää verkosta otetusta energiasta.

Kuitenkin samalla hetkellä tapahtuva verkkoon anto ja otto voidaan netottaa. Tällä on sähkön pientuottajan kannalta merkitystä tilanteissa, joissa eri vaiheiden välillä on kuormituseroja. (Lehto ym. 2017, 33). Yksivaiheisen tuotantolaitoksen tuotanto voi olla suurempi kuin kyseisen vaiheen kuorma. Tällaisessa tilanteessa ylijäämä sähköä syötetään verkkoon samanaikaisesti, kun verkosta ostetaan kahden muun vaiheen kuormitusta vastaava määrä. Samanlainen tilanne voi tulla kyseeseen myös kolmivaiheisessa pientuotannossa, mikäli kuorma on jakautunut vaiheiden välillä epätasaisesti. (TEM 2014b.)

Netotus on pientuottajalle kannattava toimenpide, jolla voidaan vaikuttaa laskennalliseen siirrettävän energian määrään. Sähköverkkoyhtiöillä on käytössä sekä vaiheiden välillä hetkellisesti netottavia mittareita että mittareita, jotka eivät netota. (Lehto ym. 2017, 33.) Osa etäluettavista mittareista laskee vaiheiden välillä yhteen samalla hetkellä tapahtuvan verkosta oton ja verkkoon syötön. Tämän summalukeman mittari vie etumerkin perusteella joko otto- tai antorekisteriin. Toiset mittarit taas vievät vaihekohtaiset lukemat sellaisenaan samoihin rekistereihin. Taloudellisesti nettomittauksen vaikutus pientuottajalle on useimmiten vähäinen. (TEM 2014b.) Nettomittausta on avattu taulukossa TAULUKKO 5 ja kuvassa KUVA 16.

TAULUKKO 5. Esimerkki netottavan ja ei-netottavan mittauksen välillä. Kun mittari on vaiheiden välillä netottava, on laskennallinen siirrettävän energian määrä pienempi kuin ei-netottavalla mittarilla. (Lehto ym. 2017.)

				Netotus vaiheiden välillä		Ei-netottava mittaus	
Aika	L1 [kWh]	L2 [kWh]	L3 [kWh]	Kulutus A+ [kWh]	Tuotanto A- [kWh]	Kulutus A+ [kWh]	Tuotanto A- [kWh]
15.00–15.15	0	3	1	4		4	
15.15–15.30	0	2	0	2		2	
15.30–15.45	–2	1	–1		–2	1	–3
15.45–16.00	–2	1	–1		–2	1	–3
Yhteensä				6	–4	8	–6



KUVA 16. Pientuotannon nettolaskutuksessa verkosta otettua sähköä (sininen) korvataan verkkoon toisena ajankohtana syötetyllä (vihreä) sähköllä (TEM 2014b).

Jos mittausta ei netoteta, voi muodostua tilanne, jossa yksivaiheisen tuotantolaitoksen tuotanto ja kulutuspisteen kuormitus pyritään keskittämään samalle vaiheelle. Tällä pyritäisiin oman tuotannon täysimääräiseen hyödyntämiseen. Tämä saattaisi johtaa sähköverkon vinokuormaan, joka ei ole toivottu tilanne.

Sähkön pientuotannon kannattavuuden parantamiseksi on esitetty vaihtoehtona myös nettolaskutusta. Nettolaskutuksella tarkoitetaan sähköverkosta otetun sähkön kompensoimista toisena ajankohtana verkkoon syötetyn sähkönarvolla. Sähkönarvo kokonaisuudessaan muodostuu energiasta, siirrosta ja veroista. Nettolaskutus voidaan toteuttaa eri tavoilla. Muuttujina laskutuksessa voivat olla sähköenergian määrä (kWh) tai arvo ($\text{kWh} \times \text{€} / \text{kWh}$). Netotus voi koskea sähköenergiaa, sähköenergian siirtoa tai molempia. Käytännössä sähkönmyyntiä ja ostoa tapahtuu molempiin suuntiin pientuottajan ja sähkönmyyjän ja -välittäjän kesken. Huomioitavaa on, että arvonlisävero ja sähkövero tulee laskuttaa ei-netotetun sähkömäärän perusteella. (TEM 2014b.)

Eri vaihtoehdot antavat useita eri vaihtoehtoja netotuksen laskentaan. Laskentajakson pituudella on merkitystä. Riippuen laskutusjakson pituudesta ja sähköntuotannon määrästä voi pientuottaja myydä sähköä kuluttamaansa enemmän. Yleisenä periaatteena kuitenkin on, ettei valitun aikajakson (netotusjakso) aikaista kulutusta suurempaa tuotantoa hyvitetä eikä siihen kohdistu ostovelvoitetta. Huomattavaa on myös, että sähköverkonhaltijat eivät voi toimia pientuotantolaitoksen tuottaman sähkön ostajina vaan sähkölle täytyy olla ostaja. Jake-

luverkonhaltijoiden täytyy hankkia välittämänsä sähkö avointen, syrjimättömien ja markkinapohjaisten menettelytapojen mukaisesti. (TEM 2014c.)

5.3 Siirtomaksu

Verkkoyhtiöiden kustannuksista suurin osa muodostuu verkkoinvestoinnista ja sen kunnossapidosta. Sähköverkko mitoitetaan kestäämään kulutushuiput. Sähkön siirron hinnoittelu on perustunut kiinteään osuuteen (€/kk) ja käytettyyn energiamäärään (€/kWh) aikajaksolla. Kiinteän osuuden suuruus on sidottu yleensä liittymän sulakekokoon.

Sähkön siirtomaksun uudeksi komponentiksi on jo joissain verkkoyhtiöissä otettu tehomaksu (€/kW). Tehomaksulla tarkoitetaan kulutuksen huipputehon (kW) huomioimista siirtohinnassa. Tehomaksun taustalla on ajatus vaikuttaa sähkönkulutukseen ja lisätä joustoa. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan tilannetta, jossa sähkönkäytössä voidaan joustaa esimerkiksi kulutushuippujen aikana. Tehomaksun käyttöönoton oletetaan parantavan asiakkaan vaikutusmahdollisuuksia sähkönkulutukseen ja kustannuksiin. Tehomaksun käyttöönotto parantaa sähkön toimintavarmuutta ja vaikuttaa myös verkkoinvestointeihin. (Pahkala, Uimonen & Väre 2018). Aurinkoenergian mikrotuotanto ei todennäköisesti vaikuta vuositasolla mitattavaan hetkelliseen huippukulutukseen. Siirtomaksujen muuttuminen tehopohjaisiksi heikentää siten oman sähköntuotannon kannattavuutta, kun ostosähkön korvaamisesta saatava etu pienenee. Voi kuitenkin käydä myös niin, että maksimaalinen aurinkoenergian tuotanto tapahtuu minimikulutuksen hetkellä. Tällöin on mahdollista, että tuotannon vaatima tehonsiirron huippu on kulutushuippua suurempi. Tämä olisi mahdollista, mikäli liittymään, joka on mitoitettu pienelle kulutukselle, liitettäisiin merkittävästi sähköntuotantoa.

5.4 Verovelvollisuus

Lähtökohtaisesti kaikki sähköntuottajat ja sähkönjakelijat ovat sähköverovelvollisia. Sähkön pientuotannolle on kuitenkin annettu lainsäädännössä verohelpoituksia eli sähkön pientuottaja on vapautettu kaikista sähköverotuksen velvollisuuksista, mikäli tuotantolaitteiston teho on pienempi kuin 100 kVA (TAULUKKO 4). Itse käytetystä sähköstä ei siis tarvitse maksaa sähköveroa, vaikka sähköä siirtyisi paikalliseen yleiseen sähköverkkoon. On kuitenkin huo-

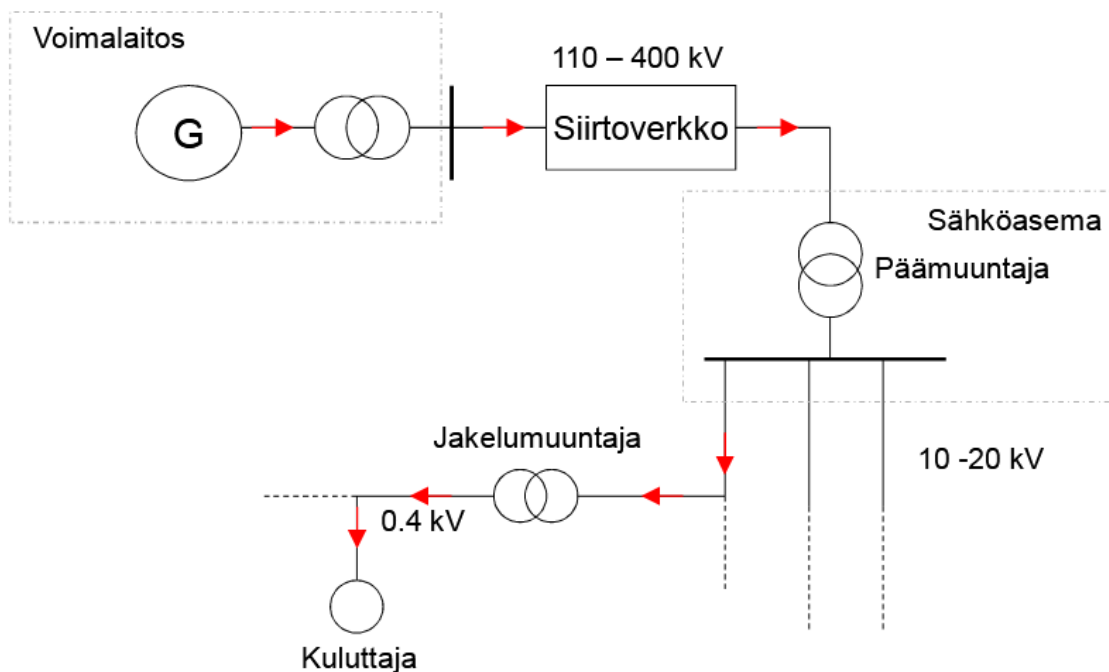
mattava, että verkkoyhtiö maksaa sähköveron, mikäli sähköä siirtyy kulutukseen muualle sähköverkossa. (Verohallinto 2014.)

Verohallinnon tulkinnan mukaan pienimuotoisessa sähköntuotannossa ns. ylijäämäsähkön myyntitulo on veronalaista tuloa. Koska ylijäämäsähkön myynti on verottajan tulkinnan mukaan kuitenkin arvoltaan vähäistä ja sähköntuotantolaitteiston kustannukset (vuotuiset menot ja poistot) ovat suuret, ei veronalaisesta sähkön myynnistä jää käytännössä verotettavaa tuloa. Pienimuotoista sähköntuotantoa ei siten tarvitse pääsääntöisesti ilmoittaa veroilmoituksella. (Verohallinto 2014.)

Verohallinnon ohjeistuksen mukaan ”Kotitalouden itse tuottaman sähkön käytöstä kotitalouden omiin tarpeisiin ei muodostu veronalaista etua, vaan kotitalouden omasta sähköntuotannosta saama etu on verovapaata elantomenojen säästöä.” (Verohallinto 2014.)

6 SÄHKÖVERKKO JA SIIHEN LIITTÄMISEN YLEISET VAATIMUKSET

Sähköverkkotoiminta Suomessa sijaitsevassa sähköverkossa on sähkömarkkinalain mukaisesti luvanvaraista. Sähköverkkoluvat Suomessa myöntää Energiavirasto. Luvanvaraista ei kuitenkaan ole sähköverkkotoiminta, jolla hoidetaan vain kiinteistön sisäistä sähkötoimitusta. (Sähkömarkkinalaki 2013) Sähköverkko muodostuu valtakunnallisesta kantaverkosta (110 - 400 kV), erillisistä 110 kV:n alueverkoista ja paikallisten sähköyhtiöiden 0,4 - 70 kV:n jakeluverkoista (KUVA 17). Sähkön kantaverkosta ja sähkön jakelusta siinä vastaa Suomen valtion pääosin omistama kantaverkkoyhtiö Fingrid. Kantaverkkoyhtiöllä on niin sanottu järjestelmävastuu, jolla viitataan kulutuksen ja tuotannon jatkuvaan tasapainossa pitämiseen. Tätä tasapainoa (käytännössä sähkön taajuutta) ylläpitääkseen täytyy käytössä olla sekä käyttö- että häiriöreserviä. (Energiavirasto 2019.)



KUVA 17. Sähköverkon rakenne tilanteessa, jossa energiantuotanto on keskitettyä (Mäki 2011).

Suurjännitteisiä jakeluverkkoja ja jakeluverkkoja Suomessa ylläpitää noin sata sähköverkkoyhtiötä. Näitä verkonhaltijoita koskevat sähköverkon ylläpito- ja kehittämisvelvollisuus, sähkönkäyttöpaikkojen ja tuotantolaitosten liittämisvelvollisuus sekä sähkön siirtovelvollisuus. Nämä sähköverkkoyhtiöt vastaavat omalta osaltaan sähkönsiirtoverkoston kunnosta ja sähkön laadusta. (Energiavirasto 2019.) Koska yhtiöillä on yksinoikeus jakeluverkon rakentamiseen alueellaan, on niiden toiminta säänneltyä ja valvottua. Sääntelyn tavoitteena on pitää sähkönsiirtohinnot kohtuullisina ja sähkönlaatu hyvänä. (Energiavirasto 2015.)

Sähkömarkkinalakia sovelletaan sähkömarkkinoihin, joilla tarkoitetaan sähkön tuotantoa, tuontia, vientiä ja toimitusta sekä sähkönsiirtoa ja -jakelua. Lain 20 §:n mukaan sähköverkonhaltijan tulee pyynnöstä ja kohtuullista korvausta vastaan liittää sähköverkkoonsa tekniset vaatimukset täyttävät voimalaitokset toiminta-alueellaan. (Sähkömarkkinalaki 2013.)

Sähkömarkkinalain mukaan jakeluverkonhaltijalla on oltava yleiset ja helposti sovellettavissa olevat menettelytavat pienimuotoisen sähköntuotannon liittämiseksi jakeluverkkoon. Verkonhaltijan on myös julkaistava liittämistä koskevat tekniset vaatimukset. Laki myös määrittelee, ettei pienimuotoisen sähköntuotannon liittäminen oikeuta perimään sähköverkon vahvistamisesta aiheutuvia kustannuksia. (Sähkömarkkinalaki 2013.)

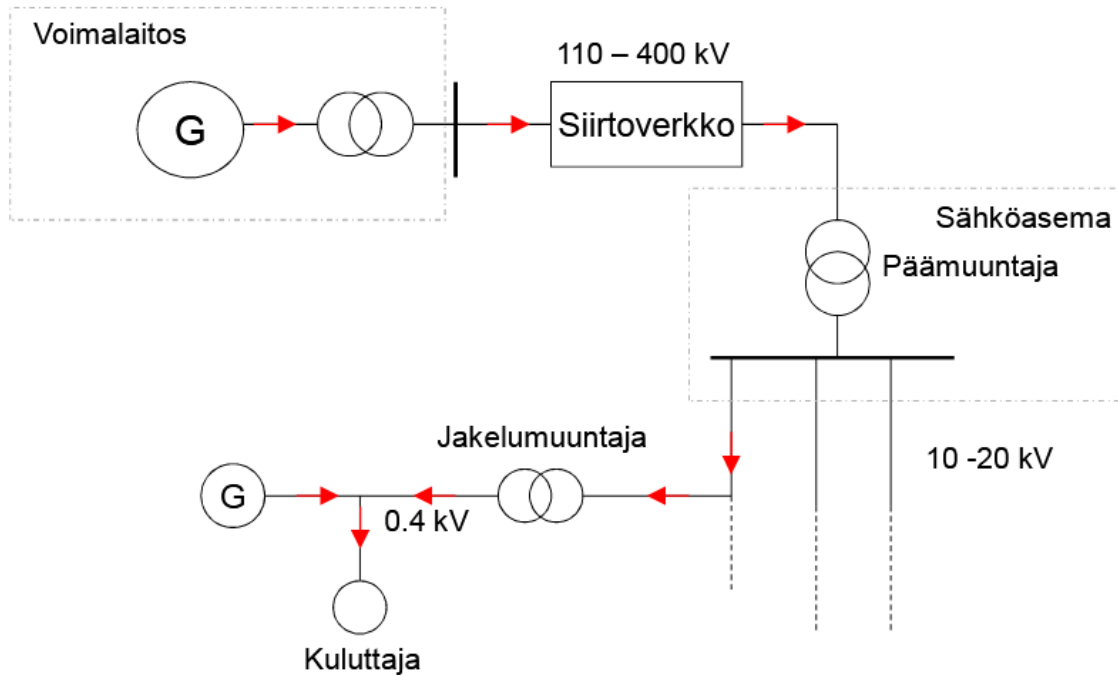
Suunniteltaessa voimalaitoksen liittämistä yleiseen sähköverkkoon (KUVA 18) on mahdollisimman varhaisessa vaiheessa hyvä selvittää verkonhaltija. Verkonhaltijaan kannattaa olla yhteydessä suunnittelun ja myöhemmin liittämisen sujuvoittamiseksi. Voimalaitoksen liittäminen yleiseen sähköverkkoon on luvanvaraista ja sallittua vain riittävän pätevyyden omaaville sähköalan ammattilaisille.

Sähkömarkkinalain vaatimusten täyttämiseksi on verkkoyhtiöillä ja alalla ohjeita. Tällaisia ohjeita ja ehtoja ovat muun muassa seuraavat:

- Verkostosuositus YA9:13 Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon 2016
- Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon 2019

- Tekninen liite 1 ohjeeseen Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon
- nimellisteholtaan enintään 100 kVA laitoksen liittäminen 2019
- Liittymisehdot 2019
- Verkkopalveluehdot 2019.

Lisäksi kullakin verkkoyhtiöllä voi olla omia ohjeita ja suosituksia.



KUVA 18. Sähköverkon rakenne sähköntuotannon ollessa hajautettua (Mäki 2011).

SESKOn (Suomen Sähköteknillinen Standardoimisyhdistys ry) standardeja mikrovoimalaitoksen liittämiseksi yleiseen verkkoon on useita. Keskeisimpiä ovat: SFS 600-7-712:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-7112: erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset Aurinkosähköjärjestelmät (Sesko 2017) sekä SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus 2015 (Sesko 2015a). Huomattavaa on, että standardi SFS-EN 50438 Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejakeluverkon kanssa rinnan toimiville mikrogeneraattoreille 2015 (Sesko ry 2015b) ei ole enää voimassa. Korvaava standardi on SFS-EN 50549-1:2019:en (2019), jota ei ole kirjoitushetkellä vielä saatavilla suomeksi.

6.1 Sähkön laatuvaatimukset

Verkkoyhtiön kannalta on ensiarvoisen tärkeää, että kaikki verkkoon liitetty tuotanto on turvallista, ei aiheuta häiriöitä ja tuotantolaitos on verkkoyhtiön tiedossa. Jakeluverkkoon kytketyllä sähköntuotantolaitoksella on vaikutusta verkon toimintaan. Vaikutusten suuruus on riippuvaista tuotantoyksikön koosta ja tyyppistä sekä sijainnista verkossa ja verkon jäykkyydestä. Verkon oikosulkuteho kuvaa sen jäykkyyttä. Vaikutus sähkönlaatuun on sitä voimakkaampi, mitä suurempi on mikrovoimalaitoksen nimellisteho suhteessa verkon oikosulkutehoon. Haja-asutusalueilla voi verkon kuormitus olla vähäistä. Tällöin verkko on mitoitettu ja rakennettu pienillä johtimien poikkipinta-aloilla. Tällaisessa tilanteessa verkon jäykkyys on heikko. Heikko verkko on alttiimpi muutoksille kuin jäykkä verkko. Merkittävimpiä vaikutuksia verkkoon liitettyllä mikrotuotannolla ovat jännitetasen nousu ja suojaukseen liittyvät seikat.

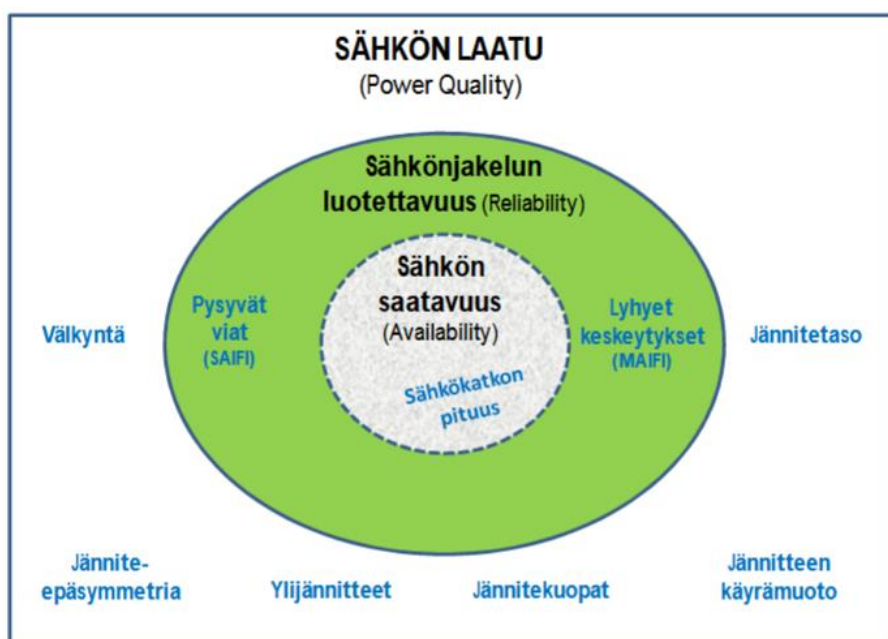
Jakeluverkon vikasuojauksessa syötön automaattisen poiskytkennän on tapahduttava enintään 5 sekunnissa. Tästä voidaan poiketa verkonhaltijan harkinnan mukaan, mikäli tämä on välttämätöntä jakeluverkon luonteesta ja sijoituksesta johtuen. Pienjänniteverkon suojaus perustuu pääasiassa sulakkeisiin. Pienjänniteverkon pienimmän oikosulkuvirran suuruus on riippuvaista suojaukseen käytettävästä sulakkeesta (TAULUKKO 6). Suunnittelussa pyritään kuitenkin siihen, että oikosulkuvirta kuluttajan liityntäpisteessä olisi minimissään 250 A (SFS 6000-801.411).

TAULUKKO 6 Pienin oikosulkuvirta, jonka mukaan jakeluverkon vikasuojaukseen käytetty ylivirtasuoja mitoitetaan.

Varoke	Pienin yksi-vaiheinen oikosulkuvirta
$gG, I_N < 63 \text{ A}$	$2,5 \times I_N$
$gG, I_N > 63 \text{ A}$	$3,0 \times I_N$

Sähkön laadulla tarkoitetaan jännitteen ja virran laatua. Standardi SFS-EN 50160 määrittelee jakelujännitteen ominaisuudet. Jännitteen laadun ominaisuuksia on useita: taajuus, jännitteen suuruus ja jännitetasen vaihtelu, nopeat

jännitteen muutokset, välkyntä, epäsymmetria, harmoniset ja epäharmoniset yliaaltojännitteet, signaalijännitteet, jännitekuopat, käyttötaajuiset ylijännitteet ja transienttijännitteet. Sähkön laatua kuvaavat myös lyhyet ja pitkät keskeytykset (KUVA 19). (SENER 2014.) Mikrotuotannon liittäminen verkkoon voi olosuhteista ja tuotantoyksiköstä riippuen joko parantaa tai heikentää sähkön laatua (Repo ym. 2003). Aurinkovoimalat liitetään verkkoon standardien mukaisilla vaihtosuuntaajilla, joten vaikutuksen sähkön laatuun oletetaan olevan vähäistä. Merkittävin sähkönlaatuun vaikuttava seikka on mahdollinen ylijännite liittymispisteessä. Myös muuntopiirin komponenttien ylikuormittuminen on mahdollista.



KUVA 19. Sähkön laatuun vaikuttavat eri tekijät. Keskiössä on sähkön saatavuus. (Partanen, Honkapuro, Lassila, Kaipia, Verho, Järventausta, Strandén & Mäkinen 2010.)

Yleiseen verkkoon rinnakkain liitettävälle sähkön mikrotuotantolaitokselle on teknisiä vaatimuksia. Nämä vaatimukset liittyvät tuotantolaitoksen suojaustoimintoihin ja toimintakykyyn eri tilanteissa. Tuotantolaitos on varustettava suojalaitteilla, jotka kytkevät tuotantolaitoksen irti yleisestä verkosta vikatilanteissa. Suojauksen asetteluarvot ja toiminta-ajat on ilmaistu tarkemmin luvussa 6 olevassa taulukossa TAULUKKO 7. Käytännössä suojalaitteet ja -asetukset on pääsääntöisesti integroitu invertteriin.

6.2 Tuotantolaitoksen vaikutus sähkönlaatuun

Sähkön tuotantolaitos ei saa merkittävästi heikentää sähkönlaatua liittämiskohdassaan. Tuotantolaitoksen vaikutus jakeluverkon sähkönlaatuun riippuu laitoksen nimelliskoosta, laitoksessa käytetystä tekniikasta sekä jakeluverkon ominaisuuksista liittymispisteessä. Kansallisissa ja kansainvälisissä standardeissa on asetettu sähkön laatua koskevia vaatimuksia, jotka myös mikrotuotantolaitoksen tulee täyttää. Jännitteen laadun tulee säilyä standardin SFS-EN 50160 vaatimusten mukaisena.

Senerin verkostosuosituksessa YA9:13 Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon määritellään mikrotuotantoa. Kyseisen suosituksen mukaisesti tuotantolaitoksen käynnistyminen tai verkosta pois putoaminen ei saa aiheuttaa yli 4 % jännitteen muutosta. (Sener 2016.) Aurinkovoimalat liittyvät verkkoon invertterillä ja tuotannon liittyminen tapahtuu portaittain. Täten mikrovoimalaitoksen käynnistymisen ei pitäisi aiheuttaa nopeita jännitemuutoksia. Mikrovoimalaitoksen irtoaminen verkosta aiheuttaa jännitteen muutoksen. Yksittäisen mikrovoimalaitoksen vaikutus verkon jännitteeseen on pieni.

Perinteisessä jakeluverkon tilanteessa, jossa tehoa on syötetty yhdestä suunnasta, on ongelmaksi voinut muodostua jännitteenalenema. Maaseutuverkoissa jännitteenalenema on yksi tärkeä verkon mitoitusperuste. Verkkoon liitetty hajautettu energiantuotanto vaikuttaa verkoston jännitteeseen sitä nostavasti. Jännitteen nousun suuruus on riippuvaista tuotannon liittymispisteen sähköisestä etäisyydestä sähköasemasta tai muuntajasta. Lisäksi jännitteeseen vaikuttaa tuotantolähteen teho suhteessa saman johtolähdön kuormaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että korvataanko tuotannolla osa kuormasta vai ylittääkö tuotanto jossain tilanteessa kulutuksen. Liitettäessä yksivaiheinen tuotantolaitos verkkoon, voi se aiheuttaa verkkoon epätasapainoa, ja vaarantaa verkon turvallisuuden ja luotettavuuden. Verkonhaltijalla onkin oikeus vaatia tuotannon liittämistä tiettyyn vaiheeseen. (Repo ym. 2003.)

Jotta pienvoimalan aiheuttama jännitteenmuutos pysyisi suosituksen mukaisena, on laitoksen nimellisteholle laskettavissa suuruus. Senerin ohjeessa (Sener

2016a) viitataan laskentakaavaan, jonka mukaan liittämiskohdan oikosulkutehon tulisi toteuttaa yhtälö:

$$S_k \geq 25 \times i_{\text{suhde}} \times S_N \quad \text{KAAVA 1}$$

Yhtälössä S_k on liittämiskohdan oikosulkuteho, i_{suhde} kytkentävirrän ja nimellisvirran suhde ja S_N on laitoksen teho. Oikosulkuvirta ja siten myös teho on sitä suurempi, mitä lyhyempi liittämiskohdan etäisyys on verkkoa syöttävästä muuntajasta. Aurinkovoimalan i_{suhde} voidaan olettaa olevan yksi eli kytkentävirta ei ole nimellisvirtaa suurempi.

Tällä hetkellä pienjänniteverkon liittymien suunnitteluvarvona pidetään oikosulkuvirtaa 250 A. Vanhemmissa liittymissä haja-asutusalueilla oikosulkuvirta voi olla paljon pienempikin. Pienjänniteverkon liittämiskohdan oikosulkuteho suunnitteluvarvoilla voidaan laskea:

$$S_k = 3 \times I_k \times U_v \quad \text{KAAVA 2}$$

$$S_k = 3 \times 250\text{A} \times 230\text{V} = 172,5 \text{ kVA}$$

Johtaen kaavasta 1 voidaan laskea mikrovoimalaitoksen maksimiteho kolmivaiheisena:

$$S_k / (25 \times i_{\text{suhde}}) \geq S_N$$

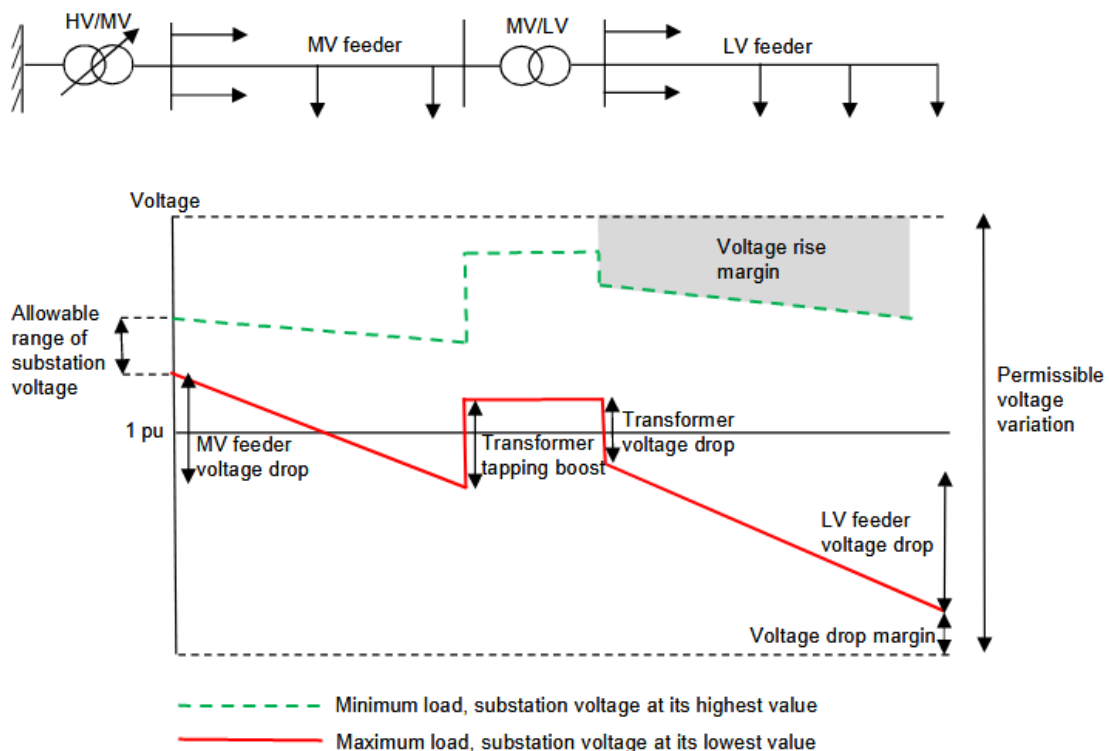
$$172,5 \text{ kVA} / 25 \geq S_N$$

$$S_N \leq 6,9 \text{ kVA}$$

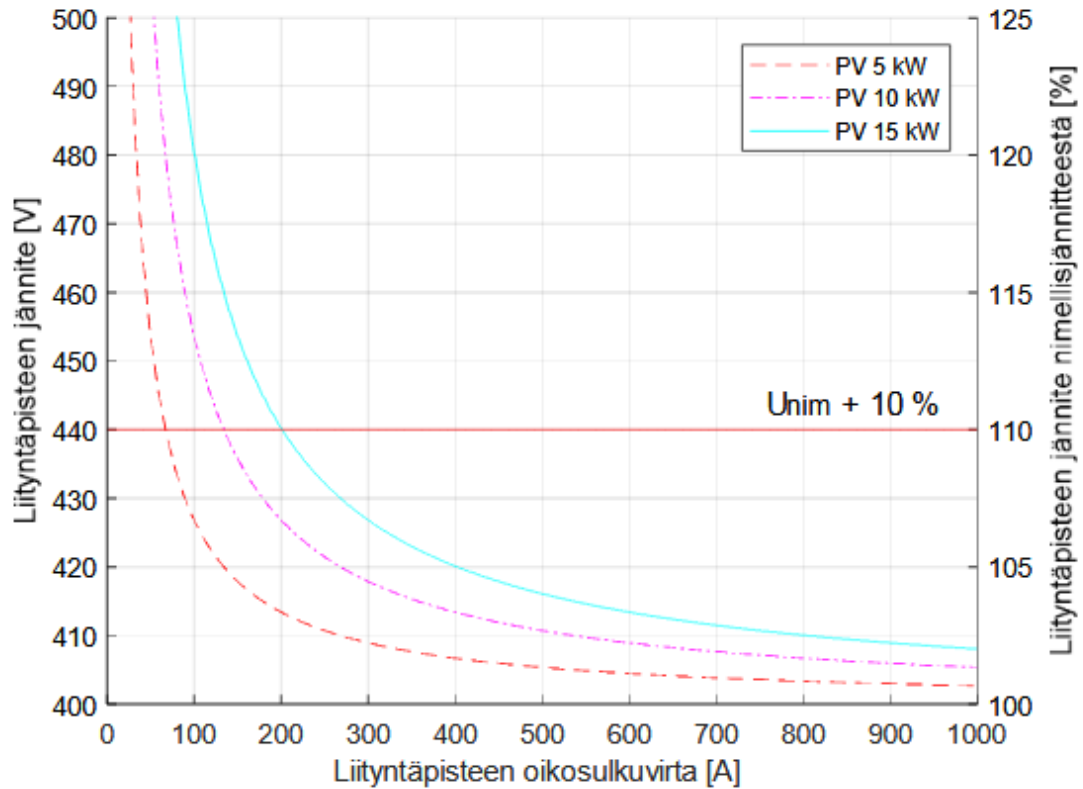
Liittämiskohdan oikosulkutehon laskemiseen tarkoitettu yhtälö (KAAVA 1) on tarkoitettu kaikille pienvoimaloille, eikä se sellaisenaan suoraan sovellu mikrotuotannon liittämistä arvioitaessa. Mikrotuotannon määrälle ja liittymän koolle ei voida asettaa ehdotonta suhdetta, koska mikrotuotannon verkkovaikutuksista on vielä vähän kokemuksia. (Sener 2016a). Yksittäisen mikrovoimalaitoksen liittäminen verkkoon standardin mukaisilla laitteilla ei yleensä aiheuta ongelmia sähkön laatuun. Tilanne muuttuu, kun voimalaitosten luku- ja tuotantomäärä kasvaa. (Mäki 2007.) Ongelmaksi voi muodostua tilanne, jossa lisätuotantoa

halutaan liittää sellaiseen verkkoon tai sen osaan, johon jo on liitetty mikrotuotantoa. Mikäli pienjänniteverkon suojaus on mitoitettu ja toteutettu standardien mukaisesti, voi muuntopiiriin kuitenkin kytkeä tuotantoa ainakin jakelumuuntajan nimellistehoa vastaava määrä. (Kaipia 2012.)

Kuvassa KUVA 20 havainnollistetaan jännitteenalenema verkossa, jossa on pelkkää kuormaa ilman verkkoon liitettyä hajautettua tuotantoa. Kuvan mukaisesti jännitteen on pysyttävä kaikissa tilanteissa määritellyn sallitun vaihteluvälin sisällä. Jakeluverkon jännitettä voidaan säätää muuntajan ominaisuuksien määrittelemissä rajoissa. Jännite jakeluverkossa vaihtelee siinä olevan kuormituksen mukaisesti. Pienin jännite voidaan mitata maksimaalisessa kuormituksessa sähköisesti kauimmaisessa pisteessä muuntajaan nähden. Suurin jännite voidaan mitata lähellä muuntajaa kuormituksen ollessa minimissään. Kun verkossa on vain kuormitusta, jännite alenee sitä enemmän mitä kauempana liityntäpiste sähköisesti on muuntajasta. Liittämällä verkkoon tuotantoa voidaan saada aikaan jännitteen nousu (KUVA 21). Jännitteenousu voi muodostua ongelmaksi, mikäli tuotanto on merkittävästi suurempaa kuin kulutus.



KUVA 20. Jännitteen profiili ja toimintarajat (Kulmala 2014).



KUVA 21 Aurinkosähköjärjestelmien vaikutus liityntäpisteen jännitetasoon eri oikosulkuvirran arvoilla. Liityntäpisteen $U_N = 400$ V, kulutus 0 W, tehokerroin 1. (Silventoinen 2018.)

Mikrotuotannon aikaansaaman jännitteen nousun ei oleteta olevan ongelma taajamien jäykissä verkoissa (Repo ym. 2003), mutta heikossa verkossa jännitteen nousu on yleisin sähköntuotantoa rajoittava tekijä (Kulmala 2014). Jos jännite nousee asetteluarvoja korkeammalle (TAULUKKO 7), täytyy voimalaitoksen kytkeytyä irti. Tämä saattaa johtaa tilanteeseen, jossa osa voimalaitoksen kapasiteetista jää käyttämättä. Uutta voimalaitoskapasiteettia verkkoon liitettäessä tulee varmistaa toimijoiden tasapuolinen kohtelu. On myös huomattava, että tuotannon aikaansaama jännitteen kohoaminen johtohaaran loppupäässä on yleensä myönteinen asia verkkoyhtiön kannalta. Jännitteen kohoaminen pienentää johdon häviöitä tehonsiirron vähentyessä.

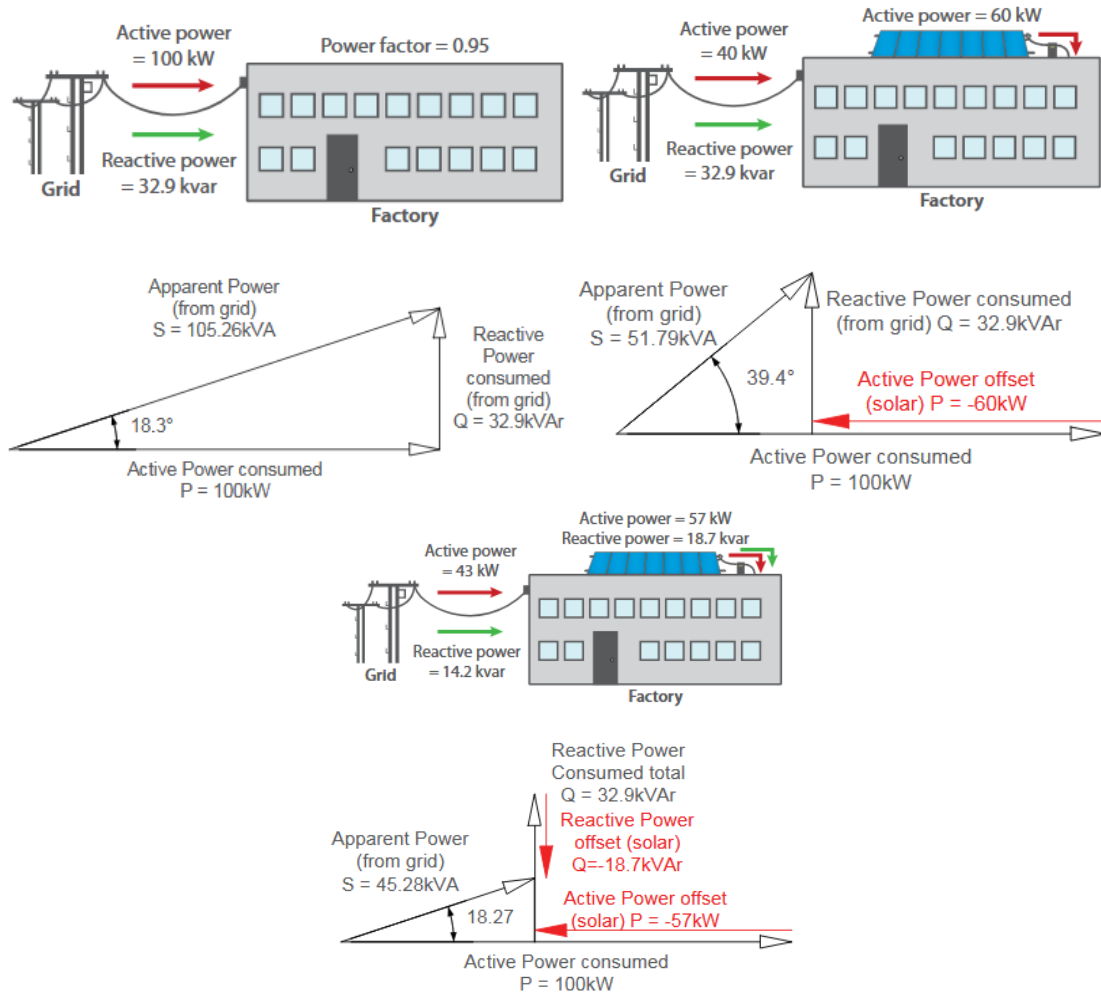
Jännitteenousun voimakkuutta voidaan arvioida laskennallisesti.

$$U_{\text{Liittymä}} \approx U_{\text{Verkko}} + \frac{(R_K * P_N + X_K * Q_N)}{U_{\text{Verkko}}}$$

KAAVA 3

Kaavassa $U_{\text{Liittymä}}$ ja U_{Verkko} ovat pääjännitteet aurinkovoimalaitoksen liittymispisteessä, R_k ja X_k ovat aurinkovoimalan liittymispisteen ja jakelumuuntajan välisen johtimien resistanssi ja reaktanssi (Ω), P_N generaattorin nimellispätöteho (W), Q_N generaattorin nimellisloisteho (Var). Yhtälöstä voidaan havaita, että jännitteen nousu on riippuvaista verkon impedanssista ja pientuotannon tehosta.

Kuten kaavasta 3 näkyy, jännite voimalaitoksen liityntäpisteessä nousee enemmän, kun sekä pätö- että loistehoa syötetään vasten verkon impedanssia. Liityntäpisteen jännitteeseen voidaan siten vaikuttaa joko muuttamalla verkon impedanssia, tuotantolaitoksen tehoa tai säätämällä pientuotannon tehokerrointa. Pienvoimalalla, jolla voi ohjata tuotannon tehokerrointa, voidaan verkkoyhtiön halutessa säädellä jännitteen muutosta. Tehokertoimen säätämisellä pyritään vaikuttamaan verkossa siirrettävän tehon määrään (KUVA 22).



KUVA 22. Loistehon säätöön kykenevällä invertterillä voidaan vaikuttaa siirrettävän tehon määrään ja siten myös liityntäpisteen jännitteeseen. Ylhäällä vasemmalla tilanne ilman paikallista sähköntuotantoa, ylhäällä oikealla maksimaalinen pätötehon tuotanto ja alhaalla tehokertoimen säätöön kykenevä invertteri. (GSES 2015.)

Standardin VDE-AR-N 4105 2018–11 mukaisella invertterillä voidaan muuttaa tehokerrointa välillä $\cos \varphi = 0.8$ kapasitiivista tai induktiivista. Invertteri voi siis toimia asetustensa perusteella tilanteen mukaan joko loistehoa tuottavana tai kuluttavana komponenttina. Jännitteen nousun kannalta pahin tilanne muodostuu, kun tuotanto (P_N) on maksimaalista kulutuksen ollessa minimissään. Kun jännite verkossa on korkeimmillaan, pienennetään loistehon tuotantoa tai jopa kulutetaan sitä. Tällä voidaan vaikuttaa liityntäpisteen jännitteeseen. Vastaavasti, kun jännite on alhainen, voidaan sitä tukea nostamalla loistehon tuotantoa.

6.3 Tekniset vaatimukset tuotantolaitoksen liittämiseksi

Sähkön mikrotuotantolaitteiston liittäminen yleiseen sähköverkkoon edellyttää aina verkkopalvelusopimuksen tekemistä sähköverkkoyhtiön kanssa. Jo olemassa olevassa liittymässä tai kulutuspaikassa tämä tarkoittaa käytännössä sopimuksen laajentamista tai päivittämistä koskemaan myös tuotantoa. Kuitenkaan olemassa olevaa liittymissopimusta ei ole välttämätöntä muuttaa tuotantolaitteiston asentaminen takia. Mikäli mikrotuotantolaitteisto rakennetaan erilleen olemassa olevasta sähköliittymästä, on sille hankittava erillinen oma liittymä. (Lehto ym. 2017.)

Sähköntuotannon liittämiseksi verkkoon on verkkoyhtiölle toimitettava keskeiset tiedot järjestelmästä. Näitä tietoja ovat ainakin perustiedot aurinkosähkölaitteistosta (nimellisteho ja -virta) ja liitäntälaitteena käytettävän vaihtosuuntaajan tyyppitiedot ja asetteluarvot. (Lehto ym. 2017.) Tietojen ilmoittamiseksi on Energiateollisuus laatinut yleistietolomakkeen Pientuotantolaitteiston ja/tai sähkövaraston liittäminen sähköverkkoon. Lomake on tämän työn liitteenä 1 ja saatavilla myös sähköisenä.

Voimalaitoksen ja siihen liittyvien osien tulee olla sähkölaitestandardien mukaisia. Useat standardit määrittelevät myös yleiseen sähköverkkoon liittämiseksi käytettävän liitäntälaitteen ominaisuuksia. Voimalaitoksen asennuksen tulee myös olla vaatimusten mukainen mm. luokse päästävyyden ja tunnistamisen osalta. Näillä pyritään varmistamaan voimalaitoksen kanssa tekemisissä olevien henkilöiden turvallisuus. (Sesko ry SFS 6000-7, 2017.) Laitteistojen verkkoliittännän tekniset haasteet ovat pienentyneet viime vuosina mm. Energiateollisuuden suositusten seurauksena. Tämä on helpottanut pientuottajan toimintaa ja mahdollistanut ns. standardituotteilla verkkoon liittymisen. (TEM 2014b.)

Tuotantolaitoksen suojaustoimintojen täytyy olla sellaisia, että jakeluverkon normaalit jännite- ja taajuusvaihtelut ovat mahdollisia. Mikrotuotannon tärkeimpiä huomioitavia seikkoja asennuksessa ja käytössä ovat takajännitevaara ja sen edellyttämät merkinnät, asennusolosuhteiden huomiointi (laitteet ja kaapelit) sekä tasasähkön vaikutus suojauksiin. (Repo ym. 2003.)

Mikrotuotantolaitoksen tahdistuminen yleisen verkon kanssa tulee olla täysin automaattista. Sähkön tuotantolaitosta ei saa liittää yleiseen sähköverkkoon, mikäli sähköverkon jännite ja taajuus eivät ole määriteltujen asettelurajojen mukaisia. Kytkeä ja verkkoon liittäminen on sallittu, kun jännite ja taajuus ovat olleet asettelurajojen mukaisia vaaditun havaintoajan. Asetteluehdot ovat riippuvaisia siitä, onko kytkentä normaalikäytön käynnistys vai automaattinen jälleenkytkentä suojauksen toiminnan jälkeen. Lyhyimpänä mahdollisena havaintoaikana molemmissa tilanteissa pidetään 60 sekuntia. Jos jakeluverkon haltija ei ole määritellyt tehon muutosnopeutta, voidaan oletusasetuksena pitää $10 \% \times P_{\text{nimellis}} / \text{min.}$ (Sener 2016.) Havaintoajasta ja tehon muutosnopeudesta on sallittua poiketa käyttöpaikalla suoritetuissa manuaalisissa käynnistyksissä kuten ensikäynnistys tai huoltotoimenpiteiden yhteydessä.

7 MIKROTUOTANTOLAITOKSEN TOIMINTA VIKATILANTEISSA

Sähkön mikrotuotanto voi aiheuttaa haasteita sähköverkkoyhtiölle. Mahdollisia mikrotuotannon aiheuttamia verkostovaikutuksia ovat ylijännitteiden lisääntyminen, lisääntynyt välkyntä tuotantotehon äkillisissä muutoksissa, tehon virtausuunnan vaihtuminen suuren tuotannon aikana, suojauksen toimimattomuus tai väärän suojan toimiminen. Nämä kaikki vaikuttavat verkon toimintaan ja suojauksiin. Erityisen tärkeää on verkon parissa työskentelevien sähköturvallisuus. Tämän takia verkkoyhtiöiden tulisi tietää kaikki verkkoon liitetyt voimalaitokset. Suomessa käytettävät suojausasetukset on kerrottu standardissa SFS-EN 50549-1. Sener:n ohjeistuksen mukaisesti useimmat verkkoyhtiöt hyväksyvät myös Saksan mikrotuotantonormin VDE-AR-N-4105 2018-11 mukaiset laitteet liitettäväksi jakeluverkkoon Suomessa. (Sener 2019a.)

Kun sähköverkkoon ei syötetä tehoa muualta, ei myöskään tuotantolaitos saa jäädä syöttämään verkkoa. Jos tuotantolaitosta halutaan käyttää varavoimana sähkökatkon aikana, tulee järjestelmään asentaa kaksoiskytkentämahdollisuus. Tällä kytkennällä mahdollistetaan tuotantolaitoksen toimiminen joko rinnan verkon kanssa tai täysin verkosta erotetussa saarekkeessa. Saarekekäytössä oleva tuotantolaitos ei saa olla yhteydessä yleiseen sähköverkkoon. (Lehto ym. 2017.) Sähköntuotantolaitos tulee olla erotettavissa verkosta. Erotuslaitteessa tulee olla näkyvä ilmaväli tai luotettava mekaaninen asennonosoitin. Erottimen käyttömekanismin tulee olla lukittava.

Mikrovoimalaitoksen liittäminen jakeluverkkoon ei saa heikentää jakeluverkon toimintakykyä eikä käyttöturvallisuutta. Pientuotannon suojauksen suunnittelusta tulee huomioida, että tuotantolaitteisto vaikuttaa normaaliin kuormitustilanteeseen, mutta mahdollisesti myös vikatilanteisiin. Perinteisessä yksisuuntaiseen tehonsiirtoon perustuvassa verkossa suojauksen selektiivinen toiminta on ollut suhteellisen helppo toteuttaa. Vikavirran suunta ja vikapaikka on tiedetty. Kun verkkoon on liitetty mikrovoimalaitos tai useampia, suojaukseen vaikuttaa verkkoon liitetyn mikrovoimalaitoksen aikaan saama vikavirtojen muutos. Verkkoon liitetyn mikrotuotannon seurauksena vikavirtaa syöttäviä pisteitä ja suuntia voi olla useita. Tilanteesta riippuen mikrovoimalaitos saattaa kasvattaa tai pie-

mentää verkossa tai sen osassa esiintyviä vikavirtoja. Tämä saattaa johtaa suo-
jauksen hidastumiseen, toimimattomuuteen tai komponenttien oikosulkukestoi-
suuden ylittymiseen. (Repo ym. 2003.)

Pienvoimaloiden asennuksen yhteydessä ei ole tarkistettu suurinta osaa mah-
dollisista vikatilanteista, eivätkä toisaalta useimmat laitokset ole joutuneet vai-
keisiin ns. ”pahin mahdollinen” -tilanteisiin. Täten niiden ongelmat saattavat olla
piileviä tällaisen tilanteen esiintymiseen saakka. Tärkeää on myös, että erotte-
lukyky toimia aiheuttavan virheen ilmentymisen ja verkkoon ”kuuluvien” häiriöi-
den välillä paranee. (Mäki 2007.)

Aurinkovoimalaitoksen vikavirran määrä on riippuvaista verkkoon liityntälaittee-
na käytetystä invertteristä. Tyypillisesti invertterin syöttämä vikavirta on enin-
tään 1,5-kertainen sen nimellisvirtaan verrattuna. Yksittäisen invertterillä yle-
iseen verkkoon liitetyn mikrovoimalaitoksen syöttämän vikavirran suuruus on siis
pieni verrattuna jakeluverkon muuntajan syöttämään vikavirtaan. Kun mikrotuo-
tannon määrä on vähäistä, ovat sen verkostovaikutukset todennäköisesti pieniä.
(Sener 2016.)

7.1 Suojauksen asettelu

Mikäli tuotantolaitoksessa ilmenee vika, on sähkötuottajan vastuulla, että se
kytketään irti verkosta mahdollisimman nopeasti. Sähköntuotantolaitoksen halti-
ja on vastuussa laitteistonsa tuottaman sähköön aiheuttamista vahingoista, jos
sähköön laatu ei ole standardien ja muiden vaatimusten mukaista. (Lehto ym.
2017) Laitteiston suojausasetusten täytyy olla standardin SFS-EN 50549-1 mu-
kaisia. Myös Saksan mikrotuotantonormin VDE-AR-N-4105 2018–11 mukaiset
laitteet voidaan liittää verkkoon. (Sener 2019a.)

Mikrotuotantolaitteisto on varustettava suojalaitteilla, jotka vikatilanteessa kyt-
kevät laitteiston irti yleisestä verkosta. Tällaisten suojalaitteiden tulee täyttää
irtoamisvaatimukset, jotka liittyvät verkon jännitteeseen ja taajuuteen
(TAULUKKO 7.) Suojalaitteet voivat olla liitettynä tuotantolaitoksen laitteisiin tai
ne voivat erillisiä itsenäisiä laitteita. Käytännössä verkkoon liitälaitteena toi-
miva invertteri kykenee hoitamaan erilaiset häiriötilanteet automaattisesti ja it-
senäisesti (Sener 2016; Lehto ym. 2017).

TAULUKKO 7. Sähkön pientuotantolaitoksen suojauksen asetteluarvoja. U_n tarkoittaa jakeluverkon normaalia nimellisjännitettä (Sener 2016; Lehto ym. 2017.)

Parametri	Toiminta-aika	Asetteluarvo
Ylijännite	0,2 s	$U_n + 10 \%$
Alijännite	0,2 s	$U_n - 15 \%$
Ylitaajuus	0,2 s	51,5 Hz
Alitaajuus	0,2 s	47,5 Hz
Saarekekäyttö	enintään 5 s	

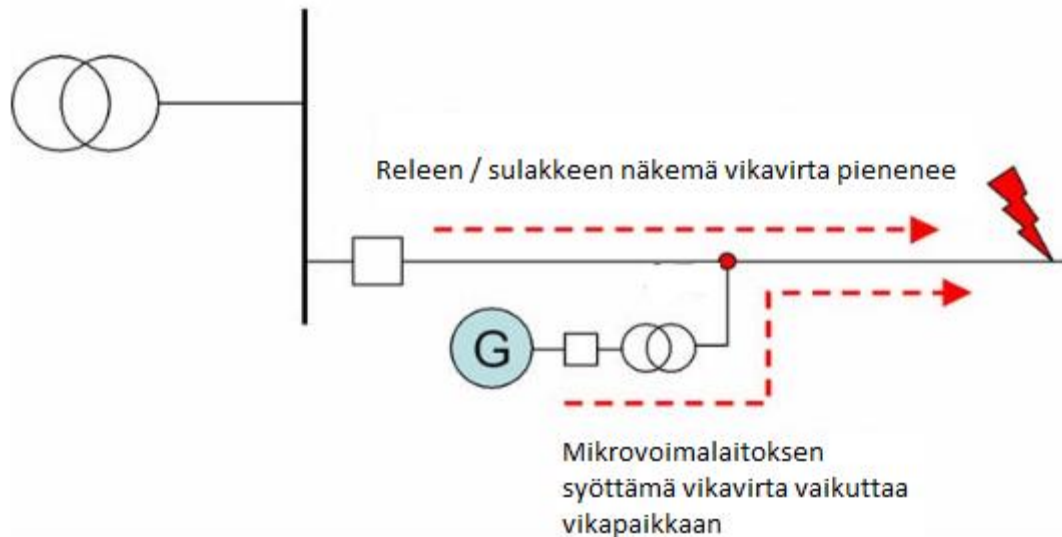
Tuotantolaitoksen tulee myös sietää verkostossa tapahtuvia muutoksia. Normaaliksi toiminta-alueeksi määritellään jännitteelle $0,85U_n - 1,1 U_n$ ja taajuudelle 49 - 51 Hz. Laitoksen tulee kestää alitaajuutta (47,5 - 49 Hz) ja ylitaajuutta (51 - 51,5 Hz) 30 minuutin ajan kytkeytymättä irti verkosta.

Kuten aiemmin todettiin, mikrovoimalaitos voi aiheuttaa verkon jännitteen nousun asetteluarvojen yli. Jännitteen nousu yli asetteluarvon yksittäisen mikrovoimalaitoksen tuotannon seurauksena ei ole todennäköistä. Jännitteen nousu voi muodostua ongelmaksi, mikäli heikkoon verkkoon on liitetty merkittävästi tuotantoa.

7.2 Suojauksen sokaistuminen

Normaalitilanteessa verkon kanssa rinnakkain toimiva pientuotanto pienentää verkon kuormitusvirtaa. Toisaalta vikatilanteessa vikavirtataso vikapaikassa voi kasvaa, mutta samanaikaisesti sulakkeen näkemä vikavirta voi pienentyä (KUVA 23. Periaatekuva: suojauksen sokaistumisessa mikrotootantolaitoksen syöttämä oikosulkuvirta voi estää suojauksen (sulake tai rele) oikean toiminnan. Vikaa ei siten havaita laisinkaan tai yhtä nopeasti kuin verkkoa suunniteltaessa on oletettu. Tästä tilanteesta käytetään ilmaisua suojauksen sokaistuminen. Suojauksen sokaistuminen voi johtaa tilanteeseen, jossa oikosulkuvirrat mikrotootantolaitoksen läheisyydessä kasvavat oletettua suuremmiksi. Ilmiön merkittävyys on riippuvainen verkosta, voimalaitoksen generaattorityypistä ja vikapaikasta suhteessa verkon ja generaattorin liityntäpisteeseen. Taajuusmuuttajan

välityksellä verkkoon liittyvän voimalaitoksen syöttämää vikavirtaa rajoittavat yleensä taajuusmuuttajan sisäiset ominaisuudet ja asetukset. Kuitenkin myös taajuusmuuttajan syöttämä vikavirta voi aiheuttaa ongelmia. (Mäki 2007.)



KUVA 23. Periaatekuva: suojauksen sokaistumisessa mikrotuotantolaitoksen syöttämä oikosulkuvirta voi estää suojauksen (sulake tai rele) oikean toiminnan (Mukailtu Mäki 2007).

Suojauksen sokaistumisen seurauksena verkon tai tuotantolaitoksen komponenttien (mm. kaapelit, jakelumuuntaja) terminen kestoisuus voi ylittyä. Ongelma ei ole kovin yleinen, mutta joissakin kohteissa riittävän vikavirtatason saavuttaminen voi olla hankalaa sulakesuojauksen näkökulmasta. Vaikka periaatteessa jo ensimmäinen liitettävä tuotantolaitos voi aiheuttaa ongelmia, on tilanne erilainen kun hajautettua mikrotuotantoa on kulutukseen nähden merkittävästi. Tällainen tilanne on mahdollinen, kun verkkoon on liittynyt useita mikrotuotantolaitoksia. (Mäki 2007.) Suojauksen sokaistuminen invertterillä verkkoon liitetyn mikrotuotannon takia on kuitenkin laskelmien mukaan epätodennäköistä (Lehto 2009; Karppanen 2012; Savolainen 2019).

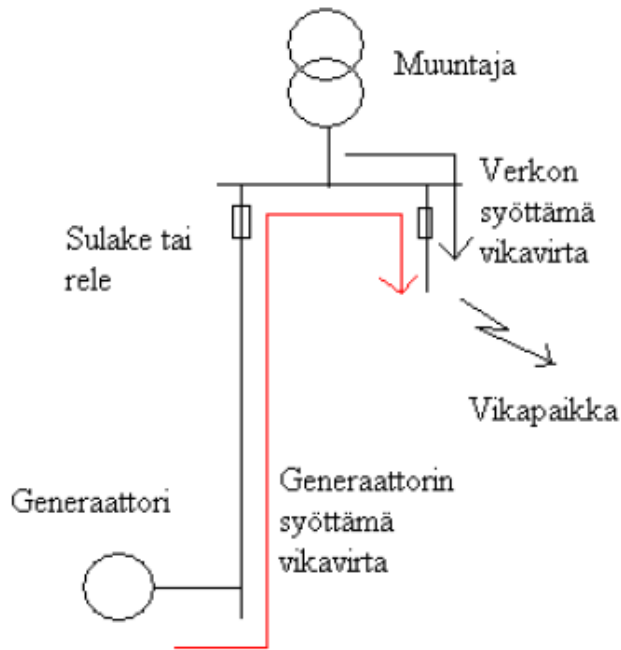
Sokaistumisen aiheuttama ongelma ei välttämättä ole suojauksen toimimattomuus, vaan se saattaa vaikeuttaa myös vikapaikan määrittämistä. Ongelma korostuu tilanteissa, joissa samassa verkon osassa on useita pieniä voimalaitoksia, eikä ole varmuutta siitä, ovatko nämä voimalaitokset irtaantuneet verkos-

ta vian seurauksena. Joissakin tilanteissa keskijänniteverkossa tapahtuvan oikosulun tai maasulun havaitseminen voi olla vaikeaa pienjänniteverkossa. Vaikeimpia havaittavia ongelmia ovat ns. Loss-of-mains ja maasulun havaitseminen. (Mäki 2007.)

7.3 Virhelaukaisu suojauksessa

Liitettäessä sähkön pientuotantojärjestelmä yleiseen verkkoon asetetaan sille vaatimuksia häiriötilanteiden ja pelastustoiminnan osalta. Näillä vaatimuksilla pyritään varmistamaan verkoston parissa työskentelevien henkilöiden turvallisuus ja koko sähköverkon toimintavarmuus, mutta toisaalta myös estämään tuotantolaitoksen rikkoutuminen sähköverkon häiriötilanteissa (Sener 2016). Toimintavarmuuteen liittyvät läheisesti sähkön laatu ominaisuudet; tuotantolaitos ei saa aiheuttaa verkkoon häiriöitä tai muiden sähkönkäyttäjien laitteiden rikkoutumista. (Lehto ym. 2017.)

Virhelaukaisulla tarkoitetaan tilannetta, jossa releen tai sulakkeen toiminta tapahtuu virheellisesti. Tämä on mahdollista tilanteessa, jossa mikrotuotantolaitos syöttää vikavirtaa saman muuntamopiirin eri lähdössä tapahtuvan vian seurauksena. Tämä mikrovoimalaitoksen vikavirta voi aiheuttaa mikrotuotantolaitoksen lähdössä sulakkeen tai releen toiminnan. Tapahtumaa on havainnollistettu kuvassa KUVA 24.



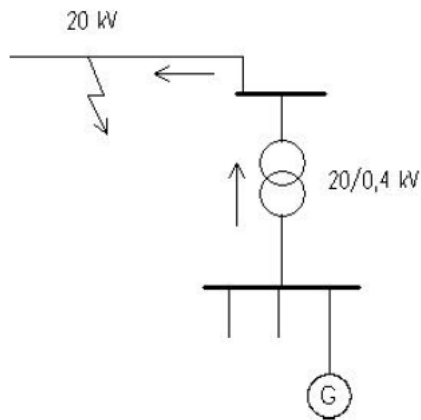
KUVA 24. Virhelaukaisussa mikrovoimalaitoksen syöttämä vikavirta voi aiheuttaa virheellisen sulakkeen tai releen toiminnan.

Virhelaukaisu ei sinällään aiheuta vaaratilannetta, vaan kyse on ennemminkin häiriöstä. Tämä häiriö vaikuttaa sekä voimalaitoksen että verkon toimintaan. Voimalaitoksen tuottamaa energiaa ei pystytä käyttämään ja väärän verkon osan suojaustoiminto voi aktivoitua. Verkon toiminnan kannalta virhelaukaisu aiheuttaa verkon luotettavuuden heikkenemisen (Mäki 2007). Yksittäisen invertterillä verkkoon liitetyn mikrovoimalaitoksen vaikutus virhelaukaisun todennäköisyyteen on vähäinen (Lehto 2009; Karppanen 2012; Savolainen 2019).

7.4 Jälleenkytkentä

Mikrotuotanto voi vaikuttaa verkon vianpoistossa käytettävään automatiikkaan. Verkon vikatilanteessa voidaan vian poistamiseksi tehdä jälleenkytkentä. Jälleenkytkennän tarkoituksena on tehdä verkko jännitteettömäksi. Jännitteettömyyden tarkoituksena on sammuttaa valokaari ja täten poistaa vikatilanne. Jälleenkytkentä tehdään ennalta määritellyn aikajaksotuksen mukaisesti. Ensimmäinen jälleenkytkentä tehdään mahdollisimman nopeasti vian havaitsemisen jälkeen. Ensimmäinen jännitteetön aika on tällöin yleensä alle sekunnin mittai-

nen. Verkkoon liitetty voimalaitos voi kuitenkin ylläpitää jännitettä verkossa ja vikapaikassa. Valokaari ei pääse sammumaan ja vian poistuminen estyy.



KUVA 25. Voimala ei ole irronnut verkosta ja se syöttää vikapaikkaan valokaarta ylläpitävän virran. Virta ei ole kuitenkaan riittävän suuri ylivirtasuojauksen toimimiseksi. (Sener 2001)

Ongelma on todennäköisin pikajälleenkytkennässä, jossa jännitteetön aika on vain sekunnin kymmenesosa. Tässä ajassa tuotantolaitoksen pitäisi irrota verkosta. Epäonnistunut pikajälleenkytkentä lisää verkon korjausta vaativien vikojen määrää, heikentää sähkön toimitusvarmuutta mm. pidentyneinä keskeytysaikoina ja näin aiheuttaa kustannuksia verkkoyhtiölle. Ongelmaa voidaan korjata verkon pikajälleenkytkentäaikaa pidentämällä, ja näin saavuttaa riittävän pitkä jännitteetön aika. (Sener 2016).

7.5 Loss Of Mains -tilanne

Tilanteesta, jossa syöttö jakeluverkosta katoaa, käytetään nimitystä Loss of Mains (LoM). Tällä tarkoitetaan tahatonta ns. saarekekäyttöä ja sen estämistä. LoM -tilanteessa mikrotuotantolaitoksen suojaustoimintojen on varmistettava, että se eroaa verkosta ja pysyy erotettuna kunnes verkko on palautunut normaalikäyttöön. Tuotantolaitoksen on irrottava verkosta 5 sekunnin aikana verkon jännitteen katoamisesta. Joissakin tilanteissa jotkin liityntälaitteet voivat toimia siten, ettei laite kykene havaitsemaan verkosta irtoamista jännite- ja taajuusreilla. Tällainen tilanne voisi olla mahdollinen, kun saarekkeen kuormat ja tuotanto olisivat lähellä toisiaan. Tämä tilanne on kuitenkin todennäköisesti ly-

hytaikainen, sillä sekä kuorma että tuotanto vaihtelevat jatkuvasti. Täten sähköntaajuuden pysyvyys määritellyissä rajoissa on lyhytaikaista.

8 TUOTANNON LIITTÄMISEN MERKITYS VERKKOYHTIÖLLE

Verkkoyhtiöiden toiminnan sääntelyn rajoitukset, ja toisaalta yhtiöiden rajalliset resurssit, vaikuttavat niiden kykyyn toteuttaa uusien teknologioiden kehitys- ja kokeilutoimintaa. Yhtiöiden toiminnan kannalta on oleellista, että oikea-aikaisesti käyttöön otettavat uudet teknologiat vastaavat tarpeeseen. Hajautetun pientuotannon lisääntyminen nähdään verkkoyhtiöissä lyhyellä aikavälillä kustannuksia kasvattavana. (Hagström, Karttunen, Vanhanen & Vehviläinen 2016.)

Sähköverkon näkökulmasta aurinkosähkön tuotanto on ristiriitainen aihe. Peruskysymys on, aiheuttaako tuotannon lisääminen verkkoon kustannuksia ja kuka mahdolliset kustannukset maksaa. Muita uhkakuvia verkon kannalta ovat monimutkaistuva verkon hallinta, verkon vahvistamistarpeen lisääntyminen, siirtotulojen pienentyminen, ylläpitokustannusten pysyminen tai kasvaminen. Verkkoyhtiön kannalta sähkön mikrotuotannosta ei nähdä olevan hyötyä verkkoyhtiölle ainakaan lyhyellä aikavälillä. Tämän vuoksi hajautettu sähköntuotanto nähdään verkkoyhtiöissä toistaiseksi usein rasitteena (Hagström ym. 2016). Toisaalta kehityksen suunta on selkeä, se tiedostetaan ja verkkoyhtiöiden tulee sopeutua muuttuvaan tilanteeseen.

Pienimuotoinen sähköntuotanto on liitettävä kohtuullisessa ajassa verkkoon, eikä liittymismaksulla saa kattaa verkon vahvistamisesta aiheutuvia kustannuksia. (Sähkömarkkinalaki 558/2013) Mikrotuotantoon tarkoitettu aurinkosähkövoimalaitos liitetään yleensä olemassa olevaan sähkönkäyttöpaikkaan. Mikrovoimalaitosten liittäminen pienjänniteverkkoon voi aiheuttaa tilanteen, jossa verkkoyhtiön on vahvistettava tai uudistettava verkostoa tai sen komponentteja. Tällainen tilanne voi tulla kyseeseen esimerkiksi haja-asutusalueella olevassa heikossa verkossa, johon halutaan liittää kuormitukseen nähden runsaasti tuotantoa. Tuotantoa voi olla myös useassa eri pisteessä samassa muuntopiirissä. Mikrovoimalaitosten vaikutukset voivat ylettyä myös jakelumuuntajan yli yläjännitepuolelle.

Suomen sähköjakeluverkko on mitoitettu huippukuormituksen mukaisesti. Täten jakeluverkon ja sen komponenttien ylikuormittuminen mikrotuotannon liittämisen seurauksena ei ole todennäköistä vaikkakin mahdollista.

8.1 Siirtohinnoittelu

Sähkön tuotanto, energian myynti ja siirto ovat eriytetty toisistaan. Pientuotannon ei katsota vaikuttavan merkittävästi itse sähkömarkkinaan. Pientuotannon määrä verrattuna keskitettyyn energiantuotantoon on vähäistä. Pientuotannolla on kuitenkin merkitystä verkonhaltijoiden toimintaan, koska tarve sähkön siirrolle säilyy. Perinteisesti sähkön siirtohinnoittelu on perustunut energiaperusteiseen muuttuvaan osaan (snt / kWh) ja kiinteään perusmaksuun (€/ kk). Perusmaksu on ollut riippuvainen erityisesti liittymän pääsulakekoosta, mutta se on voinut sisältää myös erilaisia muuttuvia osia (esim. kausi, yö-päivä-jaottelua). (Pahkala, Uimonen, & Väre 2018.)

Verkonhaltijoiden kustannukset ovat pääosin kiinteitä. Nämä kustannukset muodostuvat erityisesti investoinneista ja pääoman sitoutumisesta. Kiinteät kulut eivät ole riippuvaisia siirretyn energian määrästä. Pientuotannon lisääntymisen seurauksena siirrettävän sähkön määrä pienenee. Tämä aiheuttaa verkkoyhtiön kannalta pienemmän laskutettavan siirtomäärän. Verkonhaltijoilla on kasvava kiinnostus siirtyä siirtohinnoittelussa energiakomponentista yhä enemmän kiinteään tai tehoperusteiseen komponenttiin. Verkkoyhtiön kannalta nämä siirtohinnoittelumallit vastaavat paremmin niiden kustannuksia. (TEM 2014b) Tehoperusteisen komponentin käytöllä verkkoyhtiöt pyrkivät ohjaamaan asiakkaat pienentämään kulutushuippuja. Tämä mahdollistaisi jakeluverkkoinvestointien siirtämisen tai jopa välttämisen ja jakeluverkon toimitusvarmuuden parantamisen. (Pahkala, Uimonen, & Väre 2018.)

8.2 Nettomittarointi ja –laskutus verkonhaltijan näkökulmasta

Verkkoyhtiön kannalta nettolaskutus tarkoittaa liikevaihdon pienentymistä. Nettolaskutus voi myös lisätä verkkoyhtiön hallinnollisia kustannuksia laskutus- ja mittautiedonhallintajärjestelmien kautta. Koska verkkoyhtiöillä on alueellaan monopoli, ne kuitenkin voivat kompensoida nettolaskutuksen aiheuttaman lisäkustannuksen ja tuotonmenetykset. Mikäli sähkösiirto on yksi nettolaskutuksen

osa, on vaara, että muiden kuin pientuottajien siirtomaksut nousevat. Nettolaskutuksesta voisi siis olla haittaa muille kuin pientuottajalle. On kuitenkin arvioitu, että nettolaskutuksen vaikutus siirtoyhtiön tulokertymään on pieni, eikä sillä ole vaikutusta muiden asiakkaiden asemaan. Tilanne voi kuitenkin muuttua pientuotantomäärän kasvaessa. (TEM 2014c.)

8.3 Jännitteennousu

Sähköverkkoyhtiön kannalta mikrotuotannon merkitys verkon toimintaan on pääosin jaettavissa kahteen osaan: verkon toiminnan turvallisuus ja sähkönlaatu. Sähkönlaatuun liittyy verkon komponenttien toiminta ja kestoisuus. Saksassa mikrovoimaloita on jo runsaasti. Siellä on sähkön laadun ja verkoston osien kannalta ongelmalliseksi muodostunut jännitteen nousu (Bayer, Matschoss, Thomas & Marian 2018). Jännitteen nousu on suurinta heikoissa jakeluverkon osissa.

Mikrotuottajan toimesta jännitteennousua liityntäpisteessä voidaan estää kahdella tapaa: joko rajoittamalla verkkoon syötettävää virtaa pienen kuormituksen aikana tai vaikutetaan verkkoon syötetyn pätötehon ja loistehon määrään säättämällä pientuotannon invertterin tehokerrointa.

Verkkoyhtiön puolelta jännitteenalenemaa tai -nousua voidaan vähentää parantamalla jakeluverkon jännitejäykkyyttä. Jännitejäykkyydestä puhuttaessa tarkoitetaan verkon kykyä vastustaa kuorman tai tuotannon vaihtelusta aiheutuvia muutoksia jakelujännitteen tasoon.

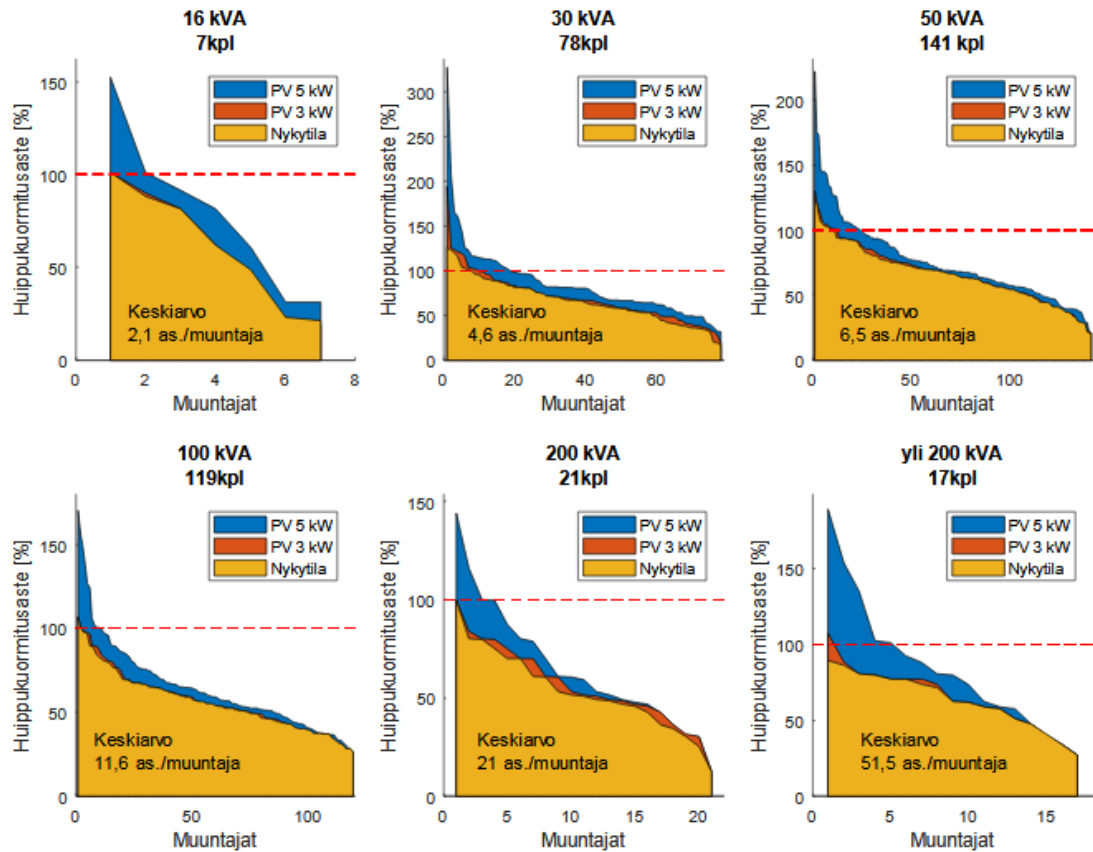
Taulukkoon TAULUKKO 8 on koottu verkkoyhtiön mahdollisuudet vaikuttaa erilaisiin vika- ja ongelmatilanteisiin. Verkkoinvestointien suunnittelussa ja tekemisessä on yhä enemmän huomioon otettavia asioita, kuten energiatehokkuus (mm. erilaiset lämpöpumput), hajautettu energiantuotanto ja sähköautot. Nämä vaikeuttavat suunnittelua (Tuunanen 2014).

TAULUKKO 8. Verkkoyhtiön toimintamahdollisuudet aurinkovoimaloiden aiheuttamien eri vika- ja ongelmatilanteiden hoidossa (Mukailtu Bayer ym. 2018).

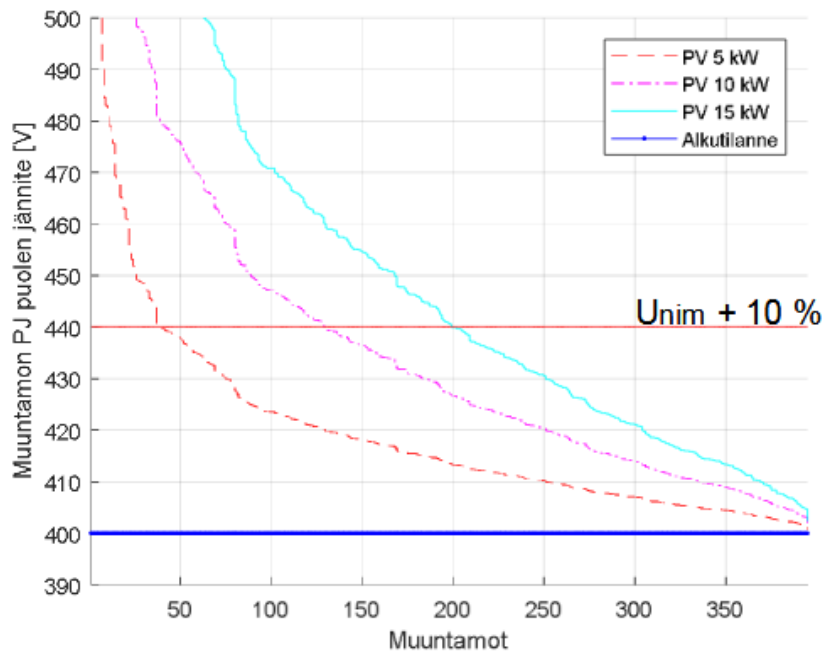
	Sallitulla jännitealueella pysyminen	Muuntajan lämpökuormittumisen välttäminen	Johdinten lämpökuorman välttäminen
Verkon saneeraus			
Jakelumuuntajan vaihtaminen	x	x	
Verkon segmentointi	x	x	x
Verkon vahvistaminen / lisäjohdin	x		x
Verkon vahvistaminen / paksumpi johdin	x		x
Älykkäät ratkaisut			
Jännitteen säädin johtolähdössä	x		
Jännitettä säättävä jakelumuuntaja	x		
Verkon optimointi			
Jakelumuuntajan yksittäisen käämikytkimen säätäminen	x		
Laaja-alainen verkon ohjaus	x		
Loistehon hallinta	x		
Topologian muuttaminen	x	x	x
Verkon käyttö ja suunnittelu			
Verkon tarkkailu			
Syötön hallinta			
Parantunut suunnittelu			

Mikrovoimalaitoksen liittäminen voi myös parantaa verkon toimintaa. Erityisesti sellaisissa kulutuspisteissä, jotka sijaitsevat kaukana muuntajasta, voi jännitteenalenema olla ongelma. Tällaiseen johtolähtöön liittyvä mikrovoimalaitos voi parantaa tilannetta nostamalla jännitetasoa verkossa.

Silventoisen (2018) mukaan usealla samaan muuntopiiriin liitettyllä aurinkosähköjärjestelmällä voi olla vaikutusta liityntäpisteen jännitteen lisäksi myös muuntamon kuormittumiseen ja pienjännitepuolen jännitteeseen. Silventoinen tarkasteli verkon jokaiseen kulutuspaikkaan liitetyn 5, 10 tai 15 kWp voimalan vaikutusta muuntajan kuormittumiseen (KUVA 26) ja jännitteeseen (KUVA 27). Tarkastelun perusteella hajautetulla mikrotuotannolla on vaikutusta verkostoon ja muuntajan kuormittumiseen. Komponenttien ylikuormittuminen on riippuvainen liitettyjen voimalaitosten määrästä ja tehosta sekä muuntopiirin ominaisuuksista. Pientuotanto vaikuttaa erityisesti alueilla, joissa pienikokoinen muuntaja syöttää useita pienen kulutuksen liittymiä. Yksittäisen tai muutaman mikrovoimalaitoksen vaikutus on verkon jännitteeseen pientä. (Silventoinen 2018.)

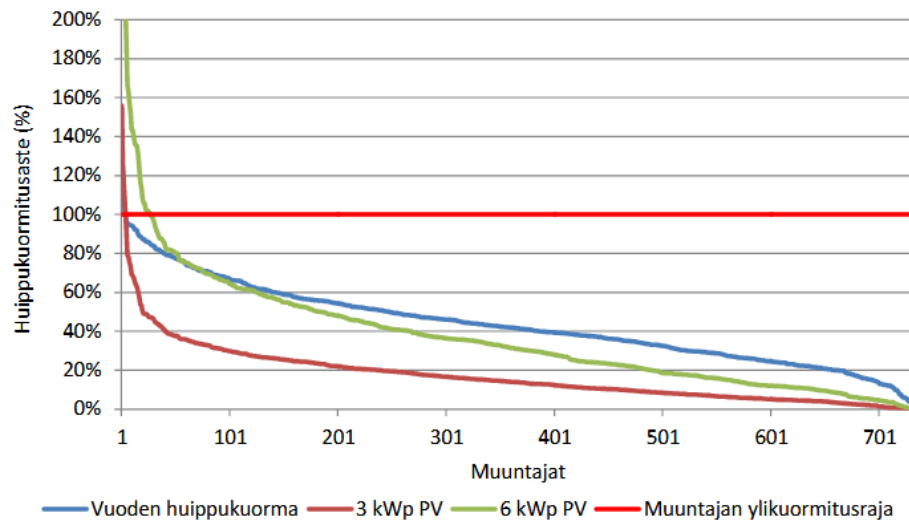


KUVA 26. Eri skenaarioita erikokoisten muuntajien kuormittumisesta, kun verkon jokaiseen kulutuspisteeseen ns. maaseutualueella on lisätty aurinkosähköjärjestelmä (3 tai 5 kW) sekä tilanne ilman tuotantoa (Silventoinen 2018).

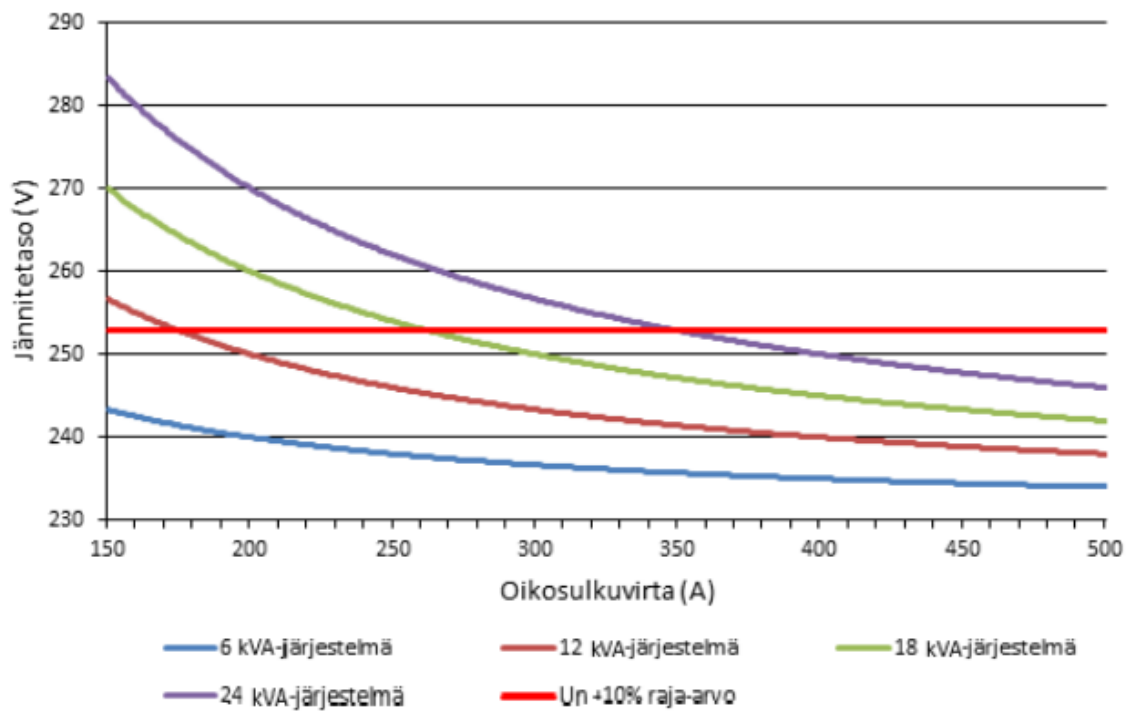


KUVA 27. Muuntamon pienjännitepuolen jännitteen suuruus, kun verkon jokaisessa liittymässä on aurinkovoimalaitos 5, 10 tai 15 kW. Vaaka-akselilla on muuntamoiden lukumäärä, pystyakselilla laskennallinen jännite muuntajan pienjännite puolella. (Silventoinen 2018.)

Konttinen (2019) tutki pro gradu -työssään aurinkovoimaloiden verkostovaikutuksia. Tarkastelun muuntopiirin jokaiseen kulutuspisteeseen liitettiin 3 tai 6 kWp:n voimalaitos. Voimalaitokset vaikuttivat muuntopiirin huippukuormitukseen (KUVA 28). Vaikutus 3 kWp -skenaariossa oli vain vähäinen, 1,1 % muuntajista ylikuormittui. 6 kWp -skenaariossa ylikuormittuneita muuntajia oli 4,1 %. Tarkastelun perusteella pientuotannon vaikutus jakelumuuntajien ylikuormittumiseen oli matala, vaikka jokaiseen kulutuspisteeseen oli asennettu 6 kWp pientuotantoa. Konttisen mukaan myöskään liityntäpisteen jännite ei ylity liitettäessä vain vähäistä tuotantoa liittymään (KUVA 29). (Konttinen 2019.)



KUVA 28. Muuntajien huippukuormitusaste eri voimalaitos skenaarioissa (Konttinen 2019).



KUVA 29. Erilaisten aurinkovoimalaitosten vaikutus liityntäpisteen jännitetasoon suhteessa verkon jäykkyyteen (Konttinen 2019).

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkölukelutoiminta on Suomessa tarkkaan säänneltyä. Verkkoyhtiöillä on velvollisuus liittää sähköntuotantolaitos verkkoonsa, eikä pienimuotoisen sähkön tuotannon liittäminen oikeuta perimään sähköverkon vahvistamisesta aiheutuvia kustannuksia. Sähkönkulutus tulee kasvamaan tulevaisuudessa yhteiskunnallisen muutoksen seurauksena. Aurinkosähköllä tuotetun sähkön osuus kokonaistuotannosta ja -kulutuksesta Suomessa on vähäistä. Aurinkosähkön kannalta haasteina ovat tuotannon vaihtelevuus sekä sähkön huippukulutuksen ja -tuotannon ajoittuminen eri aikoihin.

Hajautettu pienimuotoinen energiantuotanto tulee lisääntymään jo lähitulevaisuudessa voimakkaasti. Erityisesti alle 5 kWp aurinkosähköjärjestelmien määrän oletetaan kasvavan paljon. Vaikka taloudellisten kannustimien merkitystä ei voi vähätellä, vaikuttavat pientuotannon hankkimiseen voimakkaasti myös muut seikat kuten ikä, taloudellinen asema ja arvomaailma.

Hajautetun energiantuotannon verkostovaikutuksista merkittävimpiä ovat verkon turvallisuuteen ja sähkön laatuun liittyvät seikat. Verkon turvallisuuden kannalta on tärkeää, että kaikki verkkoon liitetty sähköntuotanto on verkkoyhtiön tiedossa. Verkkoonliityntälaitteen tulee toimia oikein sekä normaali- että vikatilanteissa. Mikrotootannon sähkönlaadun tulee olla standardien mukaista.

Suurimmat riskit liittyvät tuotantolaitoksen oikea-aikaiseen irtoamiseen verkosta, niiden tuottamaan oikosulkuvirtaan ja jännitteennousuun. Ongelmalliseksi oletetaan erityisesti maaseudun heikot verkot. Liitettäessä mikrotootantoa standardien mukaisilla tuotteilla riskien ilmentyminen vaikuttaa kirjallisuuden mukaan kuitenkin vähäiseltä. Verkkoon liitettyjen tuotantolaitosten määrän lisääntyessä verkon hallinta monimutkaistuu.

Mikrotootannon liittäminen yleiseen verkkoon vaikuttaa verkon rakenteeseen ja toimintaan. Verkonhaltijan kannalta mikrotootanto monimutkaistaa verkon hallintaa, verkon vahvistamistarve saattaa lisääntyä, siirtotulot voivat pienentyä, ylläpitokustannukset pysyä tai jopa kasvaa. Verkostosuunnittelussa tarvitaankin

uusia kuormitusmalleja, joita voidaan käyttää apuna verkkoinvestoinneista päättäessä.

Senerin suositus verkkoon liitetyn voimalaitoksen laskennallisesta maksimikoosta on $1/25$ liittämiskohdan oikosulkutehosta. Tämän kaavan noudattaminen johtaa suhteellisen pieniin voimalaitostehoihin (<6.9 kVA). Tämä voimalaitoksen maksimiteho on todennäköisesti useimmissa tapauksissa omakotitalossa asuvalle tuottajalle riittävän suuri. Muuntopiiriin voidaan liittää hajautettua tuotantoa ainakin muuntajan nimellistehon verran ilman ongelmia suurimmassa osassa verkkoa.

Verkkoyhtiöt näkevät hajautetun tuotannon lyhyellä aikavälillä omia kustannuksiaan lisäävänä ja tuloja vähentävänä. Verkkoyhtiöiden täytyy sopeuttaa toimintaansa uudenlaiseen sähköverkon käyttöön, jossa tapahtuu tuotantoa kulutuksen lisäksi useissa eri pisteissä. Verkkoyhtiöillä on käytettävissään useita eri toimia, joilla verkon toimintaa voidaan parantaa. Toiminnan parantamisessa verkkoyhtiö joutuu laskemaan eri investointien kannattavuutta. Hajautettu tuotanto voi olla verkkoyhtiön kannalta myös positiivinen asia, sillä tuotannon liittämisen seurauksena on mahdollista siirtää tai jopa välttää verkoston muutoksia.

LÄHTEET

- Bayer, B., Matschoss, P., Thomas, H. & Marian, A. 2018. The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. Renewable Energy Volume 119, April 2018, s. 129 - 141.
- Energiavirasto 2015. Valvontamenetelmät neljännellä 1.1.2016 - 31.12.2019 ja viidennellä 1.1.2020 - 31.12.2023 valvontajaksolla. Sähköinen materiaali. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10179/0/Liite_2_Valvontamenetelm%C3%A4t_S%C3%A4hk%C3%B6jakelu_luonnos.pdf/321fee5c-f449-4bc5-bae7-d1fc70b69da9 .Hakupäivä13.2.2019.
- Energiavirasto 2019. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/sahkoverkot> . Hakupäivä 13.2.2019.
- Energiavirasto 2020. Sähkön toimitusvelvollisuus- ja siirtohintojen kehitys (aikasarja). Sähköinen materiaali. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>. Hakupäivä 17.1.2020.
- GSES 2015. Power Factor and Grid-Connected Photovoltaics. GSES technical papers. Sähköinen materiaali. Saatavissa: https://www.gses.com.au/wp-content/uploads/2016/03/GSES_powerfactor-110316.pdf . Hakupäivä 17.1.2020.
- Hagström, M., Karttunen, V., Vanhanen, J. & Vehviläinen, I. 2016. Uudet teknologiat ja toimintatavat - KV11 tutkimus- ja kehityshanke. Gaia Consulting Oy. Sähköinen materiaali. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Uudet+teknologiat+ja+toimintatavat_KV11+t%26k-hanke_julkinen+loppuraportti.pdf/e896397c-9ecc-4693-b590-45c07bf3b0d1 . Hakupäivä 13.2.2019
- Kaipia, T. 2012. Aurinkosähköjärjestelmät jakeluverkon rinnalla – Sähkön käyttäjien turvallisuuteen ja sähkönlaatuun liittyvä standardointi. Sähköinen aineisto. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/jeroahola/tero-kaipia-1892012> Hakupäivä 27.11.2019

- Karppanen, J. 2012 Sähköntuotannon pienjänniteverkkoon liittäminen – määräkset ja sähköturvallisuus. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Sähkötekniikka.
- Koljonen, T., Soimakallio, S. & Hildén, M. 2019. Teoksessa: Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Koljonen ym. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019. Valtioneuvoston kanslia. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161409>. Hakupäivä 8.4.2019.
- Konttinen, M. 2019. Tulevaisuuden sähkönkäytön verkostovaikutuksien analysointi. Diplomityö. LUT School of Energy Systems. Sähkötekniikka.
- Kulmala, A. 2014. Active Voltage Control in Distribution Networks Including Distributed Energy Resources. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere 2014.
- Lassila, J., Haakana, J., Haapaniemi, J., Räisänen, O. & Partanen, J. 2019. Sähköasiakas ja sähköverkko 2030. Tutkimusraportti. LUT School of energy systems.
- Lehto, I. 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, sähkötekniikan laitos.
- Lehto, I., Liuksiala, L., Lähde, P., Olenius, M., Orrberg, M. & Ylinen, M. 2017. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus, ST-käsikirja 40. Espoo: Sähkötieto ry.
- Mäki, K. 2011. Aurinkosähköjärjestelmien verkostovaikutukset. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <https://docplayer.fi/16452358-Aurinkosahkojarjestelmien-verkostovaikutukset.html> Hakupäivä 12.12.2019.
- Mäki, K. 2007. Novel Methods for Assessing the Protection Impacts of Distributed Generation in Distribution Network Planning. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 2007. 69 s.
- Pahkala, T., Uimonen, H., & Väre, V. 2018. Joustava ja asiakaskeskeinen sähköjärjestelmä; Älyverkkotyöryhmän loppuraportti. TEM julkaisuja. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-346-7> Hakupäivä 12.8.2019.

Partanen, J., Honkapuro, S., Lassila, J., Kaipia, T., Verho, P., Järventausta, P., Strandén, J. & Mäkinen, A. 2010. Sähkönjakelun toimitusvarmuuden kriteeristö ja tavoitetasot. Energiateollisuus. Sähköinen materiaali. Saatavissa:

https://energia.fi/files/734/Sahkonjakelun_toimitusvarmuuden_kriteeristo_ja_tavoitetasot.pdf Hakupäivä 12.8.2019.

Pöyry Management Consulting Oy 2017. Hajautetun uusiutuvan energiantuotannon potentiaali, kannattavuus ja tulevaisuuden näkymät Suomessa. Valtioneuvoston selvitys-ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 5/2017. Sähköinen materiaali. Saatavissa:

https://tietokayttoon.fi/documents/10616/3866814/5_2017_Hajautetun+uusiutu-van+energiantuotannon+potentiaali%2C+kannattavuus+ja+tulevaisuuden+n%C3%A4kym%C3%A4t+Suomessa/f7fa0126-2880-452d-954b-f52ea5f0a9a0?version=1.0 Hakupäivä 14.2.2020

Repo, S., Laaksonen, H., Mäkinen, A. & Järventausta, P. 2003. Hajautetun tuotannon huomioiminen sähkönjakeluverkon suunnittelussa. Raportti3-2003 Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto

Sener. Suomen Energiateollisuus 2014. Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. Sähköinen materiaali: https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf. Hakupäivä 12.8.2019

Sener. Suomen Energiateollisuus 2016. Verkostosuositus YA9:13.

Sener. Suomen Energiateollisuus 2019a. Energiavuosi 2018 – Sähkö. Sähköinen materiaali. Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/energiavuosi_2018_-_sahko.html Hakupäivä: 8.4.2019.

Sener. Suomen Energiateollisuus 2019b. Tekninen liite 1 ohjeeseen Sähkön-tuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon – nimellisteholtaan enintään 100 kVA laitoksen liittäminen.

Sener. Suomen Energiateollisuus 2019c. Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Sähköinen materiaali. Saatavissa:

https://energia.fi/files/3888/ohje_tuotannon_liittamisesta_asiakasviestintaa_n_PAIVITETTY_20190611.pdf Hakupäivä 15.11.2019.

Sesko ry 2015b. SFS-EN 50438 Tekniset vaatimukset yleisen pienjännitejake-luverkon kanssa rinnan toimiville mikrogenaattoreille. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry

Sesko ry 2015a. SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus. Standardi. Suomen standar-disoimisliitto SFS ry, Sesko ry.

Sesko ry 2017. SFS 600-7-712:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-7112: erikoistilojen ja –asennusten vaatimukset. Aurikosähköjärjestelmät. Standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Sesko ry

Silventoinen, J. 2018. Kustannustehokkaiden verkkoratkaisujen määrittäminen haja-asutusalueille. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto LUT School of Energy Systems. Sähkötekniikan koulutusohjelma.

Sähkömarkkinalaki 2013. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <http://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588> Hakupäivä 13.2.2019

TEM 2014a. Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö lokakuuta 2014. Edita Publishing.

TEM 2014b. Pienimuotoisen energiantuotannon edistämistyöryhmän loppura-portti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto 55/2014. Edita Publishing Oy. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2859687/Pienimuotoisen+energiatuotan+non+edist%C3%A4misty%C3%B6ryhm%C3%A4n+loppuraportti+16122014.pdf> Hakupäivä 7.11.2019.

TEM 2014c. Selvitys sähkön pientuotannon nettolaskutusmenettelystä. Ra-portti 23.6.2014. KPMG Oy. Sähköinen materiaali. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2717655/KPMG_Sahkon_pientuotannon_nettolaskutusmenttely_23.6.2014_.pdf/c108a315-f73b-45b2-8981-598dfeca62d1/KPMG_Sahkon_pientuotannon_nettolaskutusmenttely_23.6.2014_.pdf.pdf Hakupäivä 10.5.2019.

TEM 2019. Sähköntuotannon skenaariolaskelmat vuoteen 2050. Sähköinen materiaali. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2132100/S%C3%A4hk%C3%B6ntuotan+non%20skenaariolaskelmat%20vuoteen%202050%20%E2%80%93%20se>

[lvitys%2022.2.2019/8d83651e-9f66-07e5-4755-a2cb70585262](https://www.stat.fi/til/salatuo/2017/salatuo_2017_2018-11-01_kuv_002.fi.html)

Ha-

kupäivä 3.5.2019

Tilastokeskus 2018, Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön ja lämmön tuotanto [verkkajulkaisu].ISSN=1798-5072. 2017, Liitekuvio 2. Sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä 2017 . Helsinki: Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatuo/2017/salatuo_2017_2018-11-01_kuv_002.fi.html . Hakupäivä 13.2.2019

Tuunanen, J. 2014. Modelling of Changes in Electricity End-Use and Their Impacts on Electricity Distribution. Väitöskirja. LUT-yliopisto.

VnA 2009a. Valtioneuvoston asetus sähkömarkkinoista 65/2009.

VnA 2016. Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta 217/2016.

Verohallinto 2014. Verohallinnon syventävät ohjeet. Kotitalouden sähköntuotannon tuloverotus. Sähköinen materiaali. Saatavissa: https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/48484/kotitalouden_sahkontuotannon_tuloverotu/ Hakupäivä: 20.2.2019